



Rúben Manuel
Macedo Pinto

**Desenvolvimento e projeto de uma impressora de
Deposição de Material Fundido com alimentação
por material granulado.**



**Rúben Manuel
Macedo Pinto**

**Desenvolvimento e projeto de uma impressora de
Deposição de Material Fundido com alimentação
por material granulado.**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Doutor António Manuel Godinho Completo, Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e do Doutor José Paulo Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo

Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor José Luis Soares Esteves

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Agradecimentos / Acknowledgements

Ao Professor Doutor António Completo e ao Professor Doutor José Paulo Santos, quero agradecer por todo o conhecimento transmitido, pela disponibilidade e orientação que me facultaram e por todo o apoio e dedicação que demonstraram ao longo deste trabalho.

A todos os que de forma direta ou indireta contribuíram para que fosse possível finalizar este trabalho, o meu muito obrigado.

A todos aqueles que me acompanharam neste percurso académico, nos bons e maus momentos, agradeço pela amizade e pelos momentos que recordarei para toda a vida. Quero especialmente agradecer ao Tiago Valdemar, Gonçalo Lopes, Barbara Azevedo, Filipa Nogueira, Fábio Alves, Rita Duarte, Pedro Mendes e Bruno Justino.

À minha namorada pela paciência e preocupação sempre demonstrada nos últimos anos.

Finalmente, aos meus pais e irmão, pela disponibilidade, sacrifícios e apoio incansável.

Palavras-chave

Extrusão por material granulado, Impressão 3D, FDM , Fabrico rápido, Prototipagem rápida, Projeto mecânico, Desenvolvimento de produto.

Resumo

O trabalho aqui reportado visa a conceção, projeto, desenvolvimento de uma impressora 3D, com alimentação por granulado, capaz de imprimir peças mais económicas, numa impressora mais económica, sendo esta a principal diferenciação relativamente às impressoras comercialmente disponíveis usando a tecnologia de fabricação por filamento Fundido (FDM). No processo de impressão 3D, o equipamento deve manter as características de funcionamento normais dentro de determinados parâmetros durante todas as fases do processo. Para tal o processo de desenvolvimento passou por uma análise competitiva deste tipo de impressoras, onde foram identificados os principais requisitos dos clientes, assim como as principais especificações técnicas associadas a integração das novas funcionalidades. A partir deste ponto aplicou-se um referencial de projeto e engenharia de produto que passou pela aplicação de um conjunto de ferramentas que tentaram sistematizar e hierarquizar a informação necessária à conceção e projeto da impressora, tais como: identificar e hierarquizar as necessidades dos clientes, estabelecer requisitos do produto e selecionar os valores alvo das especificações técnicas através da casa da qualidade (QFD). Procedeu-se ao projeto térmico e de mecânico da cabeça de extrusão e estrutura da impressora. De forma a avaliar o projeto desenvolvido, utilizaram-se ferramentas de simulação numérica com recurso ao método dos elementos finitos para uma avaliação do desempenho funcional tanto a nível estrutural como térmico. Os resultados foram obtidos a partir de simulações computacionais onde foram analisados e validados para as duas fases, de condicionamento térmico da cabeça de extrusão e para a estrutura da impressora. Posteriormente procedeu-se à realização dos desenhos técnicos, de conjunto e de definição dos elementos principais.

Keywords

Pellet extrusion, 3D printing, FDM, Rapid manufacturing, Rapid prototyping, Mechanical project, Product development.

Abstract

The aim of this study is to design, project and develop a 3D printer with a granular feeding system, capable of being a more competitive economical solution both by printing cost and acquisition price, rather than the traditionally fused deposition modeling (FDM) system printers commercially available. In the 3D printing process, the product must maintain the normal operating characteristics within certain limits during all phases of the printing process, therefore the development process underwent a competitive analysis, where the main requirements of the customers have been identified as well as the main technical specifications associated with the integration of new features. Taking this into account, it was applied a referential project and product engineering, which included the use of a set of tools that allows the collection and organization of all the information required to design and develop of the printer, such as: the identification of client needs, selection of target values related to the technical specifications of the printer and determination of their relation, through Quality Function Deployment (QFD). The next step followed a detailed mechanical and thermal design of the extrusion head as well as the printer frame. In order to assess the structural and thermal integrity of the developed project, a numerical simulation tool based on finite elements was used and validated through dedicated testing. The results were obtained from a computational simulation, which analysed and validated the temperature of the extrusion head and the structure of the printer frame. After all the testing proceeded the realization of the technical drawings of the main elements of the extrusion head and printer frame were produced.

Conteúdo

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	ix
Lista de Símbolos	xi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objectivos	1
1.3 Organização	2
2 Processos Aditivos e Prototipagem Rápida	5
2.1 Enquadramento	5
2.2 Tecnologias	6
2.2.1 Estereolitografia (SL ou SLA)	6
2.2.2 Sintetização Seletiva por Laser (SLS)	7
2.2.3 Digital Light Processing (DLP)	8
2.2.4 Multijetprinting (Polyjet)	9
2.2.5 Deposição de Material Fundido(FDM)	10
2.3 Processo de extrusão de polímeros	14
2.4 Aplicações nas indústrias	15
2.5 Impacto Ambiental	17
2.6 Impacto Económico	18
3 Processo de Desenvolvimento da Impressora 3D	21
3.1 Introdução	21
3.2 <i>Benchmarking</i>	21
3.2.1 Impressoras 3D com alimentação por granulado	22
3.2.2 Impressoras 3D com tecnologia FDM	23
3.2.3 Makerbot Replicator	23
3.2.4 Ultimaker 2+	24

3.2.5	Prusa Hephestos 2	25
3.2.6	Lulzbot TAZ 5	25
3.2.7	Makergear M2	26
3.2.8	FlashForge Creator Pro	27
3.2.9	BEETHEFIRST	27
3.3	Identificação das necessidades do Cliente	28
3.3.1	Interpretação dos Dados	29
3.3.2	Organização dos Dados	31
3.4	Hierarquização dos Requisitos	31
3.4.1	Diagrama de Mudge	32
3.4.2	Diagrama de Kano	34
3.5	Estabelecimento dos Requisitos do Produto	35
3.6	Casa da Qualidade(QFD)	36
3.7	Estudo e Considerações para o Projeto	42
3.8	Geração e Seleção de Conceitos	48
3.8.1	Decomposição de Funções	49
3.8.2	Classificação de Conceitos	49
3.8.3	Seleção	50
4	Projeto Mecânico e Térmico	67
4.1	Modelação	67
4.1.1	Cabeça Extrusora	67
4.1.2	Estrutura da Impressora	69
4.2	Análise Estrutural	72
4.2.1	Materiais e Métodos	72
4.2.2	Resultados e discussão	75
4.3	Análise Térmica	78
4.3.1	Simulação Térmica	78
4.3.2	Materiais e Métodos	78
4.3.3	Resultados e discussão	80
4.4	Orçamento	83
4.5	Desenho de Conjunto e de Definição	84
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	85
5.1	Conclusão	85
5.2	Trabalhos Futuros	86
	Bibliografia	93
	Apêndice A Análise Comparativa dos Produtos de <i>Benchmarkrting</i>	95

Apêndice B Questionário Realizado	99
Apêndice C Matriz QFD	103
Apêndice D Desenhos de Conjunto	107
Apêndice E Desenhos de Definição	113

Lista de Figuras

1.1	Estrutura da Organização da Dissertação.	3
2.1	Processo estereolitográfico	7
2.2	Desenho esquemático do processo de prototipagem rápida por SLS	8
2.3	Princípio de funcionamento do processo DLP.	9
2.4	Princípio de funcionamento da Tecnologia <i>Multijetprinting</i>	10
2.5	Princípio de funcionamento da Tecnologia FDM.	11
2.6	Processo de extrusão de polímeros.	15
2.7	Crescimento do mercado das impressoras 3D.	19
3.1	Modelo da impressora David.	22
3.2	Modelo da impressora Makerbot Replicator.	24
3.3	Modelo da impressora Ultimaker 2+.	24
3.4	Modelo da impressora Prusa Hephestos 2.	25
3.5	Modelo da impressora Lulzbot TAZ 5.	26
3.6	Modelo da impressora MakerGear M2.	26
3.7	Modelo da impressora FlashForge Creator Pro.	27
3.8	Modelo da impressora FlashForge Creator Pro.	28
3.9	Diagrama de Mudge.	33
3.10	Priorização dos Requisitos do Cliente.	33
3.11	Diagrama de Kano do projeto.	35
3.12	Matriz relações requisitos de cliente/requisitos do produto.	37
3.13	Análise competitiva e argumentos de venda.	38
3.14	Análise da concorrência dos requisitos do projeto.	38
3.15	Matriz de correlações entre os requisitos do produto.	39
3.16	Peso relativo dos requisitos de cliente obtidos com base na matriz de qualidade.	40
3.17	Gráfico da importância percentual dos requisitos do produto.	40
3.18	Parâmetros geométricos do fuso de alimentação.	47
3.19	Decomposição de Funções.	49
3.20	Materiais a selecionar para a estrutura.	51

3.21	Configuração a selecionar para a cabeça extrusora.	52
3.22	Seleção de conceitos para a extrusão ao granulado.	53
3.23	Elementos de tração do filamento.	54
3.24	Sistemas de alimentação de filamento.	54
3.25	Conceitos a selecionar para sistema de alimentação de granulado.	55
3.26	Conceitos a selecionar para aquecimento do extrusor.	56
3.27	Sistemas de arrefecimento do extrusor.	57
3.28	Métodos de aquecimento da cama de impressão.	58
3.29	Seleção dos elementos de transmissão do eixo Z.	59
3.30	Motores a selecionar.	60
3.31	Elementos a selecionar para as guias.	61
3.32	Sensor de fim de curso a selecionar.	61
3.33	Sensor temperatura a selecionar.	62
3.34	Controladores a selecionar.	63
3.35	Elementos a selecionar para redução de ruídos e vibrações	64
3.36	Elementos a selecionar para interface humana.	64
4.1	Cabeça de extrusão.	69
4.2	Modelo da cabeça de extrusão, sem escala.	69
4.3	Impressora desenvolvida.	70
4.4	Estrutura da impressora.	70
4.5	Modulo da mesa de suporte e respetivo acionamentos.	71
4.6	Localização da Fonte, controlador e LCD.	71
4.7	Vistas da modelação da impressora 3D com os acrílicos.	72
4.8	Ilustração da malha gerada.	73
4.9	Cargas aplicadas para a elaboração da simulação.	74
4.10	Análise 1.	75
4.11	Análise 2.	76
4.12	Análise 3.	76
4.13	Análise 4.	77
4.14	Modelo da cabeça da extrusora para análise térmica.	79
4.15	Modelo da cabeça com respetiva malha representada.	80
4.16	Gradiente de temperaturas.	81
4.17	Representação dos pontos de medida.	81
4.18	Curva da variação da temperatura ao longo da distância.	82
4.19	Evolução do gradiente de temperatura nos instantes descritos.	82
B.1	Questionário realizado.	101
B.2	Questionário realizado (Continuação).	102

C.1	Matriz da casa da qualidade (QFD).	105
-----	--	-----

Lista de Tabelas

2.1	Comparação de temperaturas de impressão de vários materiais utilizados pela processo FDM.	14
2.2	Indústrias e mercados que beneficiam da impressão 3D.	16
2.3	Cadeia de abastecimento da indústria de impressão 3D.	17
3.1	Especificações da impressora David.	23
3.2	Intervalo de idades dos inquiridos.	29
3.3	Respostas obtidas para a primeira questão do inquérito.	29
3.4	Necessidades do Cliente	30
3.5	Intervalo de preços que os inquiridos estão dispostos a pagar pela impressora 3D.	30
3.6	Conversão das necessidades do cliente em requisitos do cliente.	31
3.7	Requisitos e respetiva designação.	32
3.8	Nível de Importância.	32
3.9	Grau de Importância dos requisitos.	34
3.10	Requisitos do produto e suas grandezas.	36
3.11	Resumo da análise de convecção.	44
3.12	Resumo da análise de condução.	45
3.13	Considerações e assunções feitas para a seleção da potência do motor.	48
3.14	Resultados obtidos para a seleção da potência do motor.	48
3.15	Classificação de Conceitos.	50
3.16	Matriz de seleção para o tipo de material para a estrutura.	51
3.17	Matriz de seleção para o tipo de configuração para a cabeça extrusora.	52
3.18	Seleção do conceito para a movimentação do granulado.	53
3.19	Matriz de seleção da tração do filamento.	54
3.20	Matriz de seleção para o tipo de sistema de alimentação de filamento.	55
3.21	Matriz de seleção para o tipo de sistema de alimentação de Granulado.	55
3.22	Matriz de seleção para o movimento efetuado pela cabeça extrusora.	56
3.23	Matriz de seleção do componente de aquecimento do extrusor.	57
3.24	Matriz de seleção do método de arrefecimento do extrusor.	57

3.25	Matriz de seleção do método de aquecimento da cama de impressão. . . .	58
3.26	Matriz de seleção do método de transmissão de movimento aos eixos X e Y. .	59
3.27	Matriz de seleção do método de transmissão de movimento ao eixo Z. . . .	59
3.28	Matriz de seleção dos motores.	60
3.29	Matriz de seleção das guias.	61
3.30	Matriz de seleção dos sensores de fim de curso.	62
3.31	Matriz de seleção dos sensores de temperatura.	62
3.32	Matriz de seleção do controlador.	63
3.33	Matriz de seleção do sistema de redução de ruídos e vibrações.	64
3.34	Matriz de seleção de interface humana.	65
4.1	Caracterização da malha de elementos finitos.	73
4.2	Resumo das análises numéricas realizadas	74
4.3	Cargas aplicadas no modelo para simulação estrutural.	74
4.4	Os valores das propriedades dos materiais utilizados.	79
4.5	Caracterização da malha de elementos finitos.	79
4.6	Orçamento da construção da cabeça de extrusão	83
4.7	Orçamento da construção da impressora 3D.	84
A.1	Análise Comparativa.	97
A.2	Análise comparativa, continuação.	98

Lista de Símbolos

Acrónimos

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno - <i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
AM	Fabrico aditivo - <i>Additive manufacturing</i>
CAD	Desenho assistido por computador - <i>Computer aided desgin</i>
DLP	Processamento digital de luz - <i>Digital light processing</i>
EVA	Espuma vinílica acetinada
FDM	Deposição de material fundido - <i>Fused deposition modeling</i>
FFF	Fabricação de filamento fundido - <i>Fused filament fabrication</i>
HDPE	Poliétileno de alta densidade - <i>High-density polyethylene</i>
HIPS	Poliestireno de alto impacto - <i>High impact polystyrene</i>
LOM	Modelação por objeto laminado - <i>Laminated object manufacturing</i>
PS	Poliestireno
PA	Poliamida
PC	Policarbonato
PE	Poliétileno
POM	Poliacetato - <i>Polyoxymethylene</i>
PP	Polipropileno
PVA	Acetato de polivinila - <i>Polyvinyl alcohol</i>
PVC	Policloreto de Vinila - <i>Polyvinyl chloride</i>
QFD	Casa da Qualidade - <i>Quality function deployment</i>
RP	Prototipagem rápida - <i>rapid prototyping</i>
SL ou SLA	Estereolitografia - <i>Stereolithography</i>
SLS	Sinterização a laser - <i>Selective laser sintering</i>
TPU	Poliuretano termoplástico - <i>Thermoplastic polyurethane</i>

Símbolos e Constantes

H	Altura do canal
θ	Ângulo do hélice
\dot{m}_{mass}	Caudal mássico
\dot{m}_{vol}	Caudal volúmico
L_{cil}	Comprimento cilindro
α	Constante de proporcionalidade geométrica
β	Constante de proporcionalidade geométrica
D_{cil}	Diâmetro cilindro
D_B	Diâmetro do bico extrusor
D_{gran}	Diâmetro do granulado
$D_{f,e}$	Diâmetro externo do fuso
D_{cil}	Diâmetro granulado
$D_{f,i}$	Diâmetro interno do fuso
$\dot{m}_{vol,cilndro}$	Massa volúmica no cilindro de plastificação
N	Número de rotações por minuto
p_f	Passo do fuso
ΔP	Perda de carga
W_{mec}	Potência mecânica
ΔP	Queda de Pressão
L/D	Razão entre o comprimento e diâmetro do fuso
t_p	Tempo de uma rotação do fuso
T	Torque
v_{SB}	Velocidade a saída do bico extrusor
v_{cil}	Velocidade no cilindro de plastificação
μ	Viscosidade dinâmica

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Numa fase em que se assiste à revolução do uso da impressão tridimensional, este crescimento advém do facto que esta tecnologia inicialmente foi fabricada e limitada ao uso industrial. Em 2009 quando algumas patentes começaram a perder validade este mesmo produto tornou-se disponível para mercado doméstico, para pessoas com menos conhecimentos técnicos. Surge então uma necessidade contínua de desenvolvimento de novos equipamentos mais simples, mais eficientes e mais sustentáveis, de forma a responder exigências dos novos clientes e utilizadores destes novos produtos.

Para um correto funcionamento do processo de impressão 3D, o equipamento deve manter as características de funcionamento dentro de determinados parâmetros, considerados "normais", durante todo o processo de impressão. Apesar da primeira impressora industrial contar com mais de trinta anos, o desenvolvimento das impressoras comerciais são relativamente recentes e por este motivo por vezes apresentam pequenos defeitos/erros e ou limitações tais como por exemplo encravamento do filamento à entrada da unidade extrusora, baixas velocidades de disposição de material (e por consequente impressões mais demoradas), controlo de temperatura e no caso de algumas impressoras a falta de mecanismos que possam de uma forma fácil obter impressões a partir de matérias-primas. É neste contexto que surge este trabalho que visa desenvolver uma impressora 3D de baixo custo, tornando esta mais competitiva em relação ao mercado atual, e também o desenvolvimento de um sistema de alimentação que possibilite usar matérias-primas (granulado), o que implica custos de aquisição inferiores ao do tradicional fio.

1.2 Objectivos

O objetivo do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação visou o desenvolvimento, a conceção e o projeto de uma impressora 3D com a tecnologia de Deposição de

material fundido (FDM) mais económico e competitivo. Além de funcionalidade da sustentabilidade ambiental esta impressora deve exibir capacidades adicionais que a tornem mais atrativa relativamente às atualmente disponíveis no mercado. Assim pretende-se que esta apresente características técnicas e de conceção que permita um aumento da precisão dimensional e da velocidade de deposição associada ao trabalho a partir de matérias-primas em forma de granulado, e não a partir simplesmente de fio. Uma solução possível será conceber uma impressora modular, ou seja, abrangendo a possibilidade de imprimir através de fio ou de granulado consoante o projeto e a vontade do utilizador.

1.3 Organização

Este trabalho está organizado em cinco capítulos que descrevem o estudo desenvolvido. Os primeiros dois capítulos são de índole teórica referentes à temática estudada; os restantes dois referem-se ao trabalho desenvolvido para solucionar o problema proposto e conclusões da mesma. De seguida faz-se uma breve descrição sumária sobre cada um dos capítulos (ver Figura 1.1).

No capítulo 1 é expressa a motivação para a realização da dissertação e apresentados os objetivos da mesma.

No capítulo 2 faz-se uma breve introdução apresentando a revisão do estado de arte que aborda o fabrico rápido, incluindo as tecnologias mais utilizadas e uma análise de mercado do mesmo.

No capítulo 3 expõem-se todo o processo de desenvolvimento do produto, desde o *benchmarking* à geração de conceitos, passando pela identificação das necessidades e das especificações técnicas da impressora e a elaboração da casa da qualidade. No final pretende-se que esteja reunida a informação necessária para realizar o projeto mecânico e térmico.

No capítulo 4 procedeu-se ao projeto da impressora, com maior foco na cabeça de extrusão. Além da modelação, são apresentadas simulações térmicas e estruturais, de forma a confirmar a solução concebida. Ainda neste capítulo, são apresentados e discutidos os valores de temperatura obtidos no extrusor nas simulações numéricas no regime transitório e estacionário de funcionamento, assim como a discussão dos valores obtidos na simulação estrutural. Os desenhos técnicos, de conjunto e definição, são também apresentados.

No último capítulo apresentam-se as conclusões sobre o trabalho e algumas perspetivas futuras de desenvolvimento.

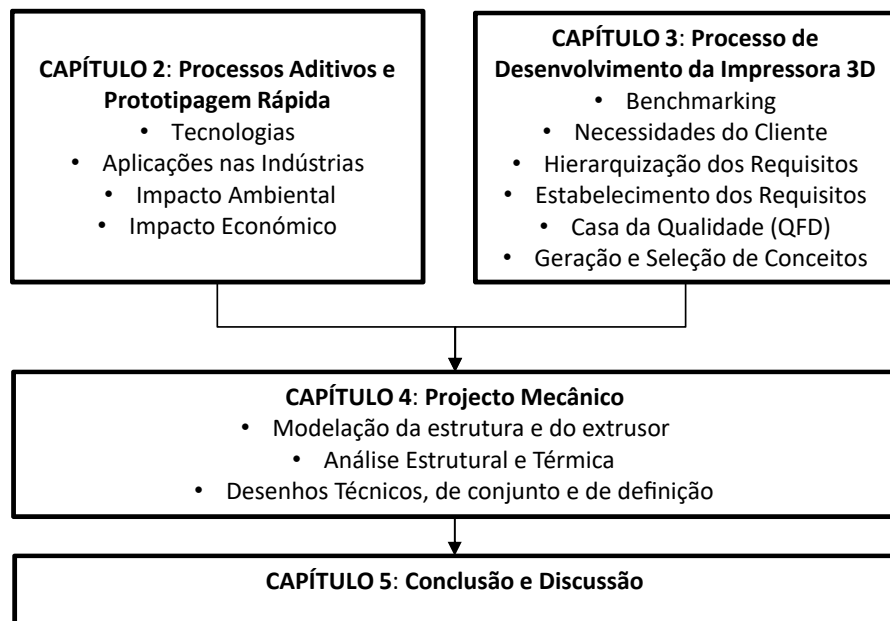


Figura 1.1: Estrutura da Organização da Dissertação.

Capítulo 2

Processos Aditivos e Prototipagem Rápida

2.1 Enquadramento

A prototipagem rápida (rápid prototyping, RP) é o termo vulgarmente utilizado para caracterizar o fabrico de modelos físicos a partir de um modelo de CAD (*Computer Aided Design*), tendo como base a utilização de um conjunto de processos tecnológicos e de tecnologias de informação. Os processos de RP permitem realizar peças de elevada complexidade, impossíveis de obter através de meios de fabrico convencionais (Simões e Relvas, 2009).

A RP surgiu em meados dos anos 80 e com o desenvolvimentos de novas tecnologias começaram a existir as primeiras máquinas de prototipagem rápida. As primeiras a aparecerem foram as de estereolitografia (SL ou SLA), apresentadas ano de 1987 pela *3D Systems*, Sinterização Seletiva a Laser (SLS), apresentada em 1989 pela *DTM*, extrusão de filamento (FDM), apresentada em 1992 pela *Stratasys* e Modelação por Objeto Laminado (LOM), apresentada em 2000 pela *Helisys* (Campbell et al., 2012; Kneissl, 2015). Estas tecnologias ainda existem hoje-em-dia excetuando a LOM talvez por se revelar um processo que gerava demasiado desperdício. Durante os anos seguintes houve um aumento do interesse da indústria que levou a inclusão de novas tecnologias, assim como a busca incessante de obter processos e tecnologias mais baratas, maior precisão, velocidade e novos materiais. Dado isto a RP, que era maioritariamente dedicada à produção de protótipos, abrange então um leque maior de aplicações. Começando assim a ser aplicada a vários sectores assim como a indústria médica, automóvel, desenvolvimento de produto, projeto de fabrico de moldes e ferramentas (Garg et al., 2014; Simões e Relvas, 2009). desenvolvimento de produto, entre outros.

Com o reconhecimento crescente desta tecnologia levou ao uso regular dos termos Fabrico Aditivo (AM - *Additive Manufacturing*) para a indústria e de impressão 3D para

o público em geral (Campbell et al., 2012).

Os processos diretos de prototipagem rápida podem ser divididos em processos aditivos e processos subtrativos. Nos processos aditivos o modelo é construído camada a camada através da adição de material, enquanto nos processos subtrativos o material é removido de um bloco inicial até chegar à forma final do objeto pretendido (Graça, 2012).

Basicamente estas tecnologias usam diversas técnicas que combinavam planos lineares de material até a obtenção da forma tridimensional do objeto (Campbell et al., 2012).

Recentemente, tem havido um grande crescimento de sistemas de baixo custo introduzidos no mercado. Sistemas estes que são maioritariamente para uso doméstico e assim conseguindo um maior número de vendas comparativamente aos utilizados na indústria. Os sistemas mais usuais utilizam a tecnologia FDM por ser um processo relativamente fácil de sintetizar (Campbell et al., 2012).

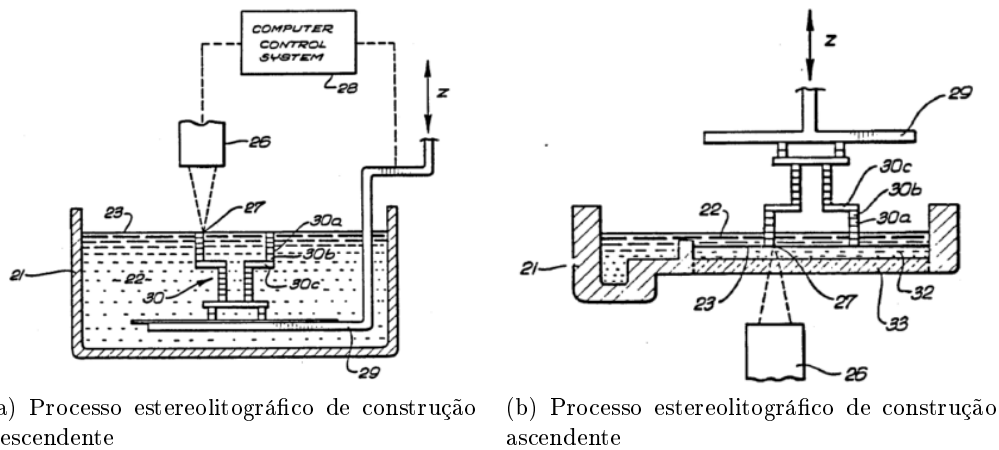
2.2 Tecnologias

Nos dias de hoje os processos aditivos ganham um maior interesse por parte da indústria em relação aos processos subtrativos. Como já foi referido anteriormente, existem um número alargado de processos (aditivos) disponíveis nos dias de hoje, dos quais se destacam a Estereolitografia (SL ou SLA), Sintetização Seletiva por Laser (SLS), *Digital Light Processing* (DLP), *Multijet Printing* (Polyjet) e Deposição de Material Fundido (FDM).

2.2.1 Estereolitografia (SL ou SLA)

A estereolitografia (SLA) foi inventada por Charle Hull. Este processo foi pioneiro nos processos de prototipagem rápida e é considerado o processo mais abrangente no mercado. É muito utilizada para visualização de conceitos pelo que esta permite gerar modelos tridimensionais complexos (Bak, 2003). É um processo aditivo que usa um tanque de polímeros líquidos fotossensíveis que solidificam por ação de radiação ultravioleta proveniente de um laser controlado por computador. A estereolitografia constrói o modelo através do direcionamento de um feixe laser sobre a superfície do tanque com resina, polimerizando deste modo uma fina camada do objeto. Após a construção de cada camada, a plataforma de suporte desce, o valor igual a espessura definida para a camada, e é sobreposta uma nova camada de resina líquida sobre a anterior. A nova camada é nivelada através de uma faca que percorre toda a superfície do tanque (Graça, 2012), repetindo-se assim o processo. Esta estratégia, corresponde ao método de construção descendente, possível de observar na Figura 2.1a. Em alternativa Hull (1986), propôs também um método de construção ascendente, possível de observar na Figura 2.1b. Neste caso, a irradiação é efetuada através de uma janela de vidro existente na base da tina que contém

a resina, sendo o modelo tridimensional construído de cima para baixo, com elevação da plataforma móvel após a solidificação de cada camada. Em termos práticos, no método descendente, a diferença manifesta-se na necessidade de existência de um nivelador para reduzir as imperfeições superficiais do modelo e estabilizar a superfície da resina líquida, uniformizando a espessura da camada, mas que aumenta a complexidade do equipamento e o tempo de construção. O mesmo não se verifica no método ascendente, no qual a janela garante a estabilização e regularidade de cada camada de resina (Matias, 2007).



(a) Processo estereolitográfico de construção descendente (b) Processo estereolitográfico de construção ascendente

Figura 2.1: Processo estereolitográfico
Adaptado de Hull (1986)

Após a finalização do processo, os objetos são lavados com um solvente e levados a uma câmara de raios ultravioleta, onde é concluída a cura da resina (Alves, 2014), uma vez que, no final do ciclo da máquina, o protótipo está aproximadamente 95% curado (Yan e Gu, 1996).

Como a construção de protótipos em estereolitografia é efetuada num meio líquido, existe a necessidade de construir suportes estruturais que garantam a replicação da geometria do modelo tridimensional sem limitações, apoiando convenientemente as camadas solidificadas, que de outra forma se encontrariam em suspensão (Matias, 2007). Os suportes estruturais permitem ainda compensar eventuais desalinhamentos entre a peça e a plataforma móvel, além de reduzirem o efeito de empenos e distorções originados pela contração do material (Grimm, 2004; Venuvinod e Ma, 2004).

2.2.2 Sintetização Seletiva por Laser (SLS)

O processo de sintetização, vulgarmente designado por sintetização seletiva por laser (SLS - Selective Laser Sintering), foi desenvolvido na Universidade do Texas por Deckard (Deckard, 1986), e consiste na utilização de um feixe de laser, geralmente de baixa potência (CO_2 de 150W) através de mecanismos de amolecimento/fusão, agregar partículas

de material em pó (Venuvinod e Ma, 2004). A energia do feixe de laser sintetiza seletivamente as zonas onde incide, permanecendo as zonas circundantes sob a forma de pó. Após a construção de uma camada, um êmbolo sobe fornecendo uma determinada quantidade de material em pó (fase de alimentação). Um rolo encarrega-se de o distribuir pela zona de trabalho criando uma camada uniforme (operação de nivelamento) e o processo recomeça com o laser a promover a solidificação e consequente adesão à camada anterior. O material não sintetizado serve de suporte ao modelo em construção (construção em cama de pó).

Em alguns equipamentos existe um sistema de pré-aquecimento por radiação infravermelha para elevar a temperatura da câmara de construção um pouco abaixo do ponto de fusão do material, reduzindo deste modo o valor da contração do protótipo.

O equipamento é complexo, permitindo no entanto obter modelos funcionais, em materiais semelhantes aos pretendidos para as peças finais e portanto com propriedades mecânicas aproximadas. Os modelos obtidos por este processo apresentam uma superfície áspera e de elevada rugosidade (Venuvinod e Ma, 2004) . A Figura ilustra de forma esquemática o processo.

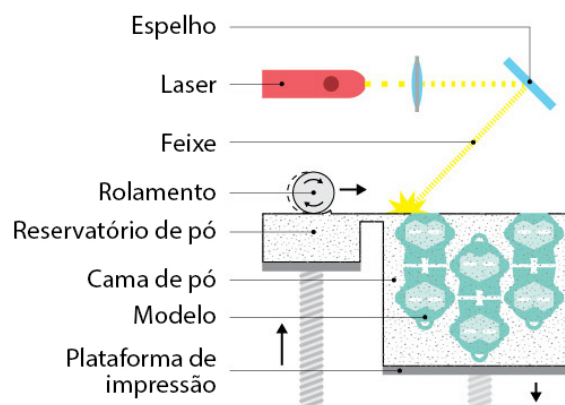


Figura 2.2: Desenho esquemático do processo de prototipagem rápida por SLS
Adaptado de 3D Hubs (2016b).

2.2.3 Digital Light Processing (DLP)

Desenvolvido e patenteado pela empresa ENVISIONTEC. Este processo utiliza resina líquida foto-sensível, à semelhança da estereolitografia, mas utiliza uma luz em vez de um laser. Utiliza uma tecnologia de projeção denominada de DLP (*Digital Light Processing*), que utiliza cerca de 1,5 milhões de micro espelhos que podem ser controlados individualmente, para criar a projeção de um plano de secção do objeto a construir (Graça, 2012) . A luz UV é emitida para a superfície do líquido , endurecendo-o. Este sistema funciona com *voxels* individuais, ou *pixels* volumétricos, em vez de camadas, o que significa que

as superfícies das peças obtidas são consideravelmente mais suaves do que os sistemas convencionais baseados em camadas e podem ser utilizados diversos tipos de materiais, como: cera, resinas, compósitos cerâmicos, etc. (Alves, 2014; Graça, 2012). O processo é consideravelmente mais rápido do que a estereolitografia e outros sistemas semelhantes. Peças fabricadas por DLP são construídas de forma invertida, com o modelo suspenso do lado de baixo da plataforma de construção.

O material de apoio é adicionado para auxiliar a produção de áreas suspensas, podendo ser removido rapidamente, e não tem um impacto importante sobre o tempo de pós-processamento.

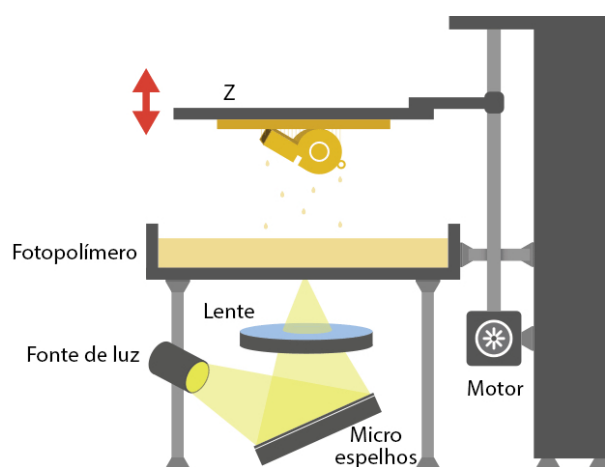


Figura 2.3: Princípio de funcionamento do processo DLP.
Adaptado de 3D Printing Industry (2016)

2.2.4 Multijetprinting (Polyjet)

A primeira impressora 3D baseada na tecnologia *multijetprinting* da Polyjet foi introduzida no mercado em Abril de 2000 pela empresa Objet que atualmente é detida pela Stratasys. Esta tecnologia funciona num sistema semelhante ao jato de tinta de impressão de documentos. Mas em vez de depositar gotas de tinta sobre papel, este processo deposita, por jato, camadas de um foto-polímero líquido sobre uma plataforma de construção que é imediatamente curado com luz ultravioleta, como demonstra a Figura 2.4. Os modelos curados podem ser manipulados e utilizados imediatamente, sem pós-cura adicional. Juntamente com a deposição do material estrutural da peça, a impressora 3D deposita igualmente o material de suporte, especialmente concebido para apoiar e suportar saliências e geometrias complexas. O material de suporte é facilmente removido à mão e com água. Esta tecnologia de impressão 3D tem muitas vantagens, incluindo a qualidade e velocidade superiores, alta precisão e uma ampla variedade de materiais Alves (2014).

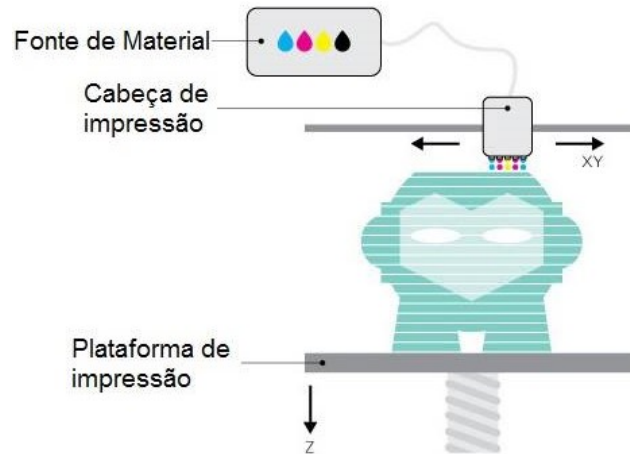


Figura 2.4: Princípio de funcionamento da Tecnologia *Multijetprinting*.
Adaptado de 3D Hubs (2016b).

2.2.5 Deposição de Material Fundido(FDM)

O processo de deposição de material fundido, FDM, foi inventado por S. Scott Crump em 1989. Este processo de prototipagem rápida é baseado na deposição por extrusão de termoplásticos aquecidos, como mostra a Figura 2.5, apesar dos fundamentos do processo permitirem a sua aplicação a uma grande variedade de materiais, tais como: ceras, termoplásticos, metais e elastômetros. O processo consiste em aquecer o material até uma temperatura ligeiramente acima da temperatura de fusão o que permite que o material flua facilmente e solidifique assim que entre em contacto com uma superfície sólida. A camada correspondente à secção do modelo é construída pela deposição por varrimento de um filamento de material extrudido. No final da construção de uma camada a plataforma desce e o processo repete-se até o protótipo estar completo. Durante o fabrico do protótipo pode haver a necessidade de criar suportes estruturais, que serão posteriormente removidos. O processo poderá ocorrer dentro de uma câmara aquecida para uma minimização de deformações decorrentes da variação da temperatura (Crump, 1992; Graça, 2012).

Com a expiração de pelo menos uma das patentes de S. Scott Crump permitiu a empresas como a RepRap desenvolver os próprios sistemas de extrusão e utilizar a designação *Fused Filament Fabrication* (FFF) para fornecer um termo legalmente irrestrito na sua utilização (Langnau, 2012).

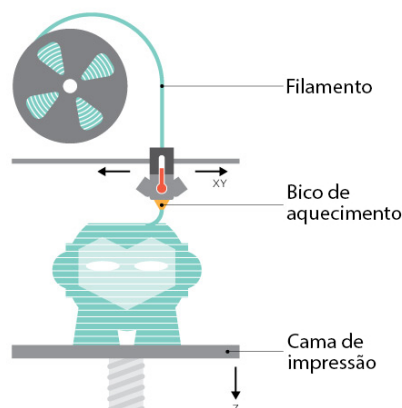


Figura 2.5: Princípio de funcionamento da Tecnologia FDM.
Adaptado de 3D Hubs (2016b).

Fatores que influenciam a qualidade e acabamento da tecnologia FDM

O efeito de escada é uma consequência inevitável quando se fabricam peças com base em técnicas aditivas (construção camada a camada), resultando numa excessiva rugosidade superficial. Investigações experimentais têm demonstrado que os fatores predominantes na qualidade do produto final são (Sun et al., 2008):

- Trajetória de deposição;
- Velocidade de deposição;
- Espessura da camada;
- Orientação da peça;
- Aquecimento e Arrefecimento do Material;
- Material.

Materiais usados

Os materiais utilizados na tecnologia FDM são de natureza polimérica. De acordo com Manrich (2005), "Polímero é qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que tenha um alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixo peso molecular."

Existem diversas classificações de polímeros, sendo que cada classificação tem por base a sua área de aplicação. No processamento de plásticos, do ponto de vista tecnológico, a principal divisão de polímeros divide-se em termoplásticos e termoendurecíveis.

Os polímeros termoplásticos podem ser submetidos a ciclos de fundição e solidificação diversas vezes, com pouca ou nenhuma variação das suas propriedades básicas.

Os termoendurecíveis, ou termofixos, são polímeros que não podem ser repetidamente fundidos ou dissolvidos sem que haja degradação da sua estrutura química após sofrerem o processo de cura (formação de ligações cruzadas).

Os polímeros podem ser amorfos, cristalinos ou apresentar uma percentagem dos dois na sua composição (semicristalinos). Esta percentagem depende de diversos fatores, como estrutura molecular, peso molecular, processamento mecânico, entre outros.

Polímeros amorfos (do grego, a, sem, *morphous*, forma) não apresentam forma definida. Podem ser representados como longas cadeias flexíveis entrelaçadas, sem uma orientação específica. Polímeros cristalinos são compostos por estruturas altamente organizadas e compactas denominadas cristais. Um cristal pode ser formado por moléculas que se dobram sobre si mesmas e se empilham sobre outras moléculas igualmente dobradas (Casagrande, 2013).

Existem duas grandezas de vital importância para a caracterização dos polímeros: a temperatura de transição vítrea, T_g , e a temperatura de fusão cristalina, T_m . A temperatura de transição vítrea (do inglês, *glass transition temperature*) está associada à natureza amorfa dos polímeros. Nesta temperatura ocorre gradualmente uma migração de um estado vítreo (sólido) para o estado fluído (plastificado), gradualmente. Portanto, abaixo de T_g , as moléculas apresentam-se quase totalmente imóveis, sem movimentação, apenas vibração parcial; acima de T_g as moléculas apresentam um aumento expressivo na movimentação browniana, sendo mais facilmente deformáveis por tensão de corte. A temperatura de fusão cristalina (do inglês, *melting temperature*) é a temperatura onde ocorre a mudança de estado, ou a mudança de fase (cristalina para amorfa) do polímero. Nesta temperatura ocorre uma alta absorção de energia para a dissolução dos cristais. Depois de T_m todo o material se encontra num estado amorfo, e caso o material seja totalmente amorfo não possuirá T_m , uma vez que não existe fase cristalina para ser transformada. Os polímeros são compostos basicamente por resinas e aditivos, sendo a resina o composto principal, conferindo nome ao polímero, e os aditivos são compostos adicionados para mudar certas propriedades do polímero, adequando-o a um uso específico. Segue abaixo as principais definições de aditivos e resinas (Morales, 2009).

- **Nafta:** é um derivado do petróleo e é matéria prima dos monómeros mais importantes.
- **Resina:** é o componente básico na forma granulada e que determina a classificação do plástico. As resinas que mais se destacam pela facilidade de processamento, e baixo preço são o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) e Policloreto de Vinila (PVC). Já as principais resinas de alto desempenho são o Policarbonato (PC), Poliacetal (POM), Poliamida (PA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno

(ABS).

- **Plastificante:** são líquidos que entram em ebulição a temperaturas de 96°C a 202°C e tem a finalidade de melhorar a fluidez do material.
- **Lubrificante:** Tem a finalidade de impedir a adesão do plástico. Os mais usados são: óleo de rícino, óleo de linhaça, lanolina e parafina.
- **Corante:** responsável pela coloração do material plástico.
- **Catalisador:** controla o grau de polimerização da resina.
- **Estabilizante ou Antioxidante:** é um aditivo que tem por objetivo evitar o ataque do plástico pelo oxigénio ou ozono presentes no ar, impedindo também a deterioração devido à ação da radiação ultravioleta, radioatividade, calor e intempéries.
- **Termoestabilizante:** minimiza o efeito danoso de altas temperaturas sobre o plástico.
- **Massa ou carga inerte:** é um material inerte, fibroso e que além de dar maior resistência ao plástico, reduz o custo de fabrico. São utilizados como carga inerte o pó de madeira, papel, algodão, grafite, talco, pó de mica e pó de pedra.
- **Carga de reforço:** é um material que tem como objetivo aumentar a resistência mecânica do plástico. A mais utilizada é a fibra de vidro.
- **Retardadores de Chama:** aditivo anti-chama que torna o polímero auto extingível.

De todos os materiais poliméricos os mais populares são ABS e PLA. Os polímeros podem dividir-se em cinco categorias, sendo estas categorizados por convencionais, flexíveis, compósitos, especiais e para suporte. Cada tipo de filamento tem características próprias logo dependem da temperatura do extrusor e da cama. Na Tabela 2.1 é apresentada uma vasta gama de materiais e as temperaturas necessárias para a sua utilização.

Tabela 2.1: Comparação de temperaturas de impressão de vários materiais utilizados pela processo FDM.

Adaptado de MatterHackers (2016).

Grupo	Material	Temp. Extrusor (°C)	Temp. Cama (°C)
Filamentos Convencionais	PLA (Polylactic Acid)	180-220	20-55
	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	220-260	80-110
	Nylon (Polyamide)	235-270	60-80
	PET (Polyethylene Terephthalate)	230-255	55-70
Filamentos Flexíveis	TPE	210-225	20-55
	Soft PLA (Polylactic Acid)	220-235	20-55
	TPU (Thermoplastic Polyurethane)	240-260	40-60
Compósitos	LAYBRICK	180-200	20-55
	LAYWOO-D3	175-250	30
	Conductive ABS Filament	225-260	90-110
	LayCeramic	260-275	20-55
	Carbon Fiber Reinforced PLA	195-220	50
	Steel PLA	195-220	50
	Magnetic Iron PLA	185	20-55
	Fill Series	190-210	20-55
	Lay-Felt	225-235	20-55
	Gel-Lay	225-235	20-55
	LAY-FOMM 60	220-230	40-60
	PC (Polycarbonate)	270-310	20-55
Filamentos Especiais	Bendlay	210-240	20-55
	MoldLay	170-180	20-55
	PVA (Polyvinyl Acetate)	170-190	45
Filamentos para Suporte	High Impact Polystyrene	220-230	50-60

2.3 Processo de extrusão de polímeros

Os equipamentos de extrusão muitas vezes são complexos de operar, no entanto, todo o processo é relativamente simples. O processo de extrusão de plástico começa com a seleção do material polimérico em forma de granulado ou pó. Este posteriormente é alimentado por um fúnil e é conduzido por um fuso, que o impulsiona ao longo de todo o processo. Esta é a parte mais importante do processo e diversas variáveis como a temperatura de processamento, tipo de fuso e a velocidade do processamento devem ser consideradas. Tais variáveis dependem, obviamente, das características do material a ser processado. Os fusos podem possuir diferentes perfis de rosca e são caracterizados pela razão L/D (comprimento/diâmetro). O fuso pode ainda ser dividida em três zonas, correspondentes às etapas do processamento. São elas a zona de alimentação, compressão e a dosagem, que representam 50, 25 e 25 % do comprimento do fuso, respetivamente. O diâmetro do fuso aumenta ao longo dessas etapas, ou seja, o raio da rosca aumenta ao longo do cilindro de plastificação, o que também proporciona a geração de calor por atrito (*shear heat*). Este calor gerado e o fornecido ao sistema, no cilindro de plastificação, permitem a fusão do material polimérico e o aquecimento deste até à temperatura de processamento definida para o material. No final do processo o material fundido é

forçado através de um orifício com forma e dimensões desejadas para a obtenção do perfil desejado. A extrusão é um processo contínuo utilizado para dar forma final aos produtos. O processo descrito está apresentado esquematicamente na Figura 2.6.

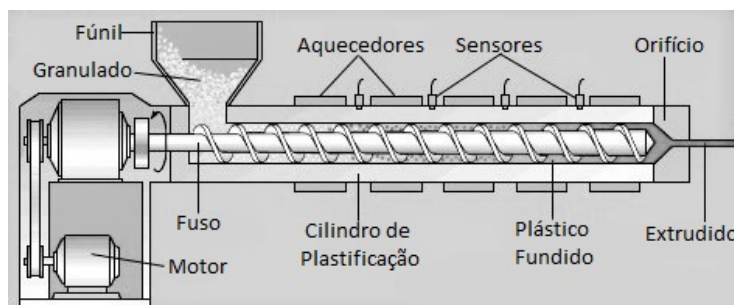


Figura 2.6: Processo de extrusão de polímeros.
Adaptado de Petervaldívia (2015)

O processo de extrusão apresenta uma boa solução para a obtenção de perfis uma vez que é um processo contínuo e de alta produtividade. As matérias primas podem ser utilizadas em diferentes formas (pellets, cargas na forma de pó) podendo ser até mesmo recicladas. Os produtos finais deste processo são: tubos, mangueiras, revestimentos de fios e cabos, extrusão de chapas para transformação entre outros. Em contra partida, quando a peça final possui perfis muito complexos, a extrusão não é o processo mais indicado, pois esta possui limitações nas matrizes (definição da sua forma sólida/moldagem).

2.4 Aplicações nas indústrias

As maiores indústrias a beneficiar da impressão 3D estão sumarizadas em seguida (Grenda, 2012; Zhang, 2014):

Indústria automóvel: impressoras 3D convertem potenciais *designs* de peças de carros em protótipos. Podem ser também impressas peças finais pelo consumidor, para adaptar necessidades aderentes, diretamente da impressora.

Bens de consumo e electrónica: Impressoras 3D conseguem fazer produtos estruturais, joalharia, adereços para casa, adereços de moda e têxtil e ainda comida. Com o passar dos tempos cada vez mais existem impressoras a preços mais baixos, dando a possibilidade dos consumidores de imprimirem os seus *designs* para o uso diário.

Indústria Médica e Dentária: impressão 3d produz, com precisão, uma variedade de serviços personalizados, tais como implantes e próteses, instrumentos cirúrgicos, engenharia de tecidos, produtos farmacêuticos e formas de dosagem, dispositivos médicos e odontológicos.

Indústria Aeroespacial: peças complexas para aeronaves são normalmente criadas em pequenas quantidades por impressão 3D. Os requisitos rigorosos para ambas as estruturas e materiais têm empurrado para a frente os avanços de impressoras 3D e consequente propagação para as outras indústrias.

Máquinas Indústrias e de Negócio, Moldes e Ferramentas: Protótipos de novos modelos e ferramentas rápida são algumas das primeiras aplicações. A impressão 3D proporciona baixo volume de produção e produtos altamente personalizados para engenheiros.

Algumas outras aplicações incluem prototipagem usada por instituições acadêmicas, governo e exército, arquitetura e engenharia. As suas aplicações são apresentadas na Tabela 2.2, relatório feito pela empresa *Sculpteo* (Sculpteo, 2015).

Tabela 2.2: Indústrias e mercados que beneficiam da impressão 3D.

Adaptado de Sculpteo (2015).

Mercados/Indústria	%	Mercados/Indústria	%
Bens de consumo	26,00%	Aeronáutica e Aeroespacial	3,00%
Alta tecnologia	15,00%	Retalho	3,00%
Bens industriais	14,00%	Automóvel	2,50%
Eletrónica e Eletricidade	8,00%	Energética	2,00%
Serviços	7,50%	Marítima	1,00%
Educação	6,00%	Comida processada	1,00%
Mecânica e metálica	5,00%	Têxtil e armamento	0,60%
Saúde	5,00%	Química	0,30%

Para resumir, a cadeia de abastecimento da indústria de impressão 3D é mostrada na Tabela 2.3. As empresas que fazem o fabrico de impressoras 3D cobram a produção das mesmas e parte dos serviços relacionados dependendo da escala da empresa. As principais diferenças entre as impressoras 3D industriais e pessoais são maioritariamente os preços, tamanho, precisão, materiais e área de impressão.

Os utilizadores alvo, indústrias e os de dois tipos de impressoras 3D são comparados na Tabela 2.3. Ainda assim, os dois tipos de impressoras têm sobreposições de aplicações e clientes, por exemplo, produtos de consumo, arquitetura e empresas de design (Zhang, 2014).

Tabela 2.3: Cadeia de abastecimento da indústria de impressão 3D.

Adaptado de Zhang (2014).

<i>Input</i>	Impressoras 3D	Serviços	Utilizadores	Indústrias e Mercados	<i>Outputs</i>
- Plástico, resinas, metais e outros matérias de construção - Programação de computadores, design 3D, edição e software de renderização	- Impressoras 3D industriais	- Venda de materiais de construção - Atualização e manutenção	- Empresas de fabricação - Empresas de serviços médicos - Governo e exército	- Automóvel - Aeroespacial - Máquinas indústrias e de negócio - Médica e dentária	- Peças para máquinas - Dispositivos médicos - etc.
	- Impressoras 3D pessoais	- Treino de operadores - Programação 3D	- Empresas de arquitetura e design - Escritórios comerciais - Instituições académicas - <i>Hobby's</i> individuais	- Bens de consumo e eletrónica - Arquitetura e design - Educação	- Protótipos - Bens de consumo - etc.

2.5 Impacto Ambiental

Nos últimos anos a impressão 3D tem vindo a ser uma tendência e os números não param de crescer, sendo por isso necessário ter em consideração o impacto ambiental do mesmo. A impressão 3D tem três principais vantagens ambientais comparado com os processos subtrativos convencionais sendo que o impacto ambiental dos processos aditivos são mais reduzidos. As principais vantagens encontram-se sumarizados em seguida:

- Em primeiro lugar há pouco desperdício, somente o material necessário é utilizado para a fabricação da peça;
- O segundo é que a mesma máquina pode construir muitas peças diferentes e complexas. Desta forma, não é preciso criar equipamentos especializados para cada diferente produto;
- Finalmente, as impressoras criam produtos a partir de um ficheiro digital, e que permite a facilitação do mesmo por qualquer meio de comunicação digital, ou seja, as peças e os produtos podem ser impressos exatamente no local de venda, reduzindo assim a necessidade de transporte.

Estes benefícios, no entanto, não se aplicam a todos os casos. Algumas impressoras, como por exemplo as impressoras de deposição a laser, consomem mais energia por quilo de metal processado do que os métodos tradicionais, como fundição ou maquinagem. Neste caso, ainda é preciso investir em pesquisa e desenvolvimento para atingir melhores

níveis de eficiência de escala. Sendo assim a tecnologia de impressão 3D pode ser o caminho para um novo modo de produção descentralizado e de menor impacto ambiental.

2.6 Impacto Económico

A construção de modelos e protótipos é muitas das vezes uma necessidade e constituiu um papel fundamental no processo de desenvolvimento de produto. A prototipagem rápida hoje em dia tem uma importante participação no projeto de produto, ora como forma eficaz de comunicação entre as equipas de projeto e auxílio no processo de decisão, ora na antecipação de testes que indicam erros cometidos no projeto ainda nas fases iniciais de desenvolvimento. Estes modelos são elaborados de forma a poder ser testada a sua funcionalidade, realizar estudos estéticos (nomeadamente formas e cores) e também para auxílio de projeto de fabrico de moldes e ferramentas. Dado que cada vez mais as empresas estão sujeitas a melhorar a sua competitividade a nível económico, os erros de projeto devem ser antecipados numa fase mais inicial do projeto. A identificação e a resolução de problemas encontrados no início do projeto de desenvolvimento de produto diminuem os custos e aumentam a possibilidade de implementação das soluções encontradas, uma vez que esse processo é menos dispendioso numa fase mais inicial do mesmo. No caso do fabrico de pequenas e médias séries, a prototipagem rápida poderá ser uma alternativa de fabrico de ferramentas de produção, reduzindo-se os custos desses equipamentos e aumentando a rentabilidade dos investimentos necessários no lançamento de novos produtos no mercado (Simões e Relvas, 2009).

Nos últimos anos o custo e dificuldade de utilização afastavam os interessados, no entanto através do projeto RepRap a primeira impressora de uso comercial aparece. Assim que outros produtores começam a desenvolver as suas próprias impressoras os valores das mesmas passam a ser cada vez mais pequenos, onde primeiro se pagava 200 mil euros passa-se a pagar menos que 2000 euros. Desde então as vendas deste produto vêm a crescer e hoje-em-dia já existem mais de 300 mil consumidores, e cada ano que passa este número duplica. A indústria de impressão 3D cresceu 34.9% em 2013, o que é o maior crescimento anual datado em 17 anos e é ainda estimado um maior aumento até 2020 (3D Hubs, 2016b). Na figura 2.7 é possível observar o crescente crescimento do mercado das impressoras 3D.

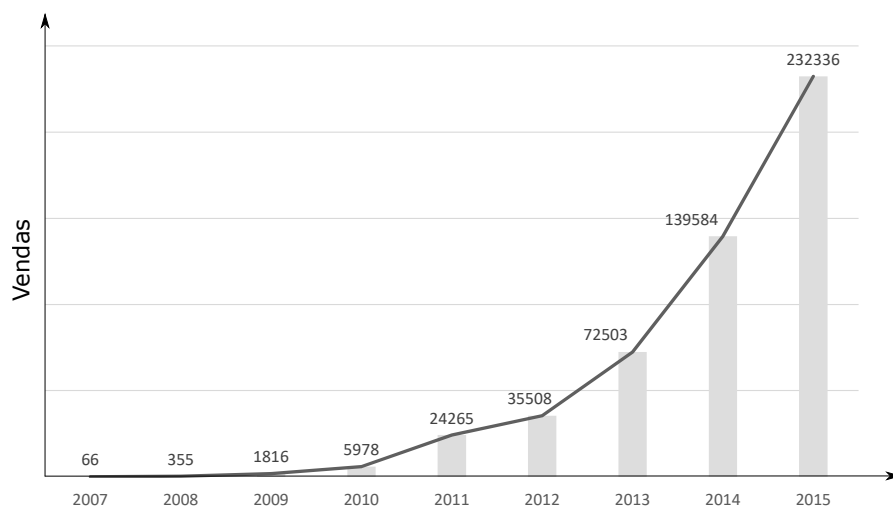


Figura 2.7: Crescimento do mercado das impressoras 3D.
Adaptado de 3D Hubs (2016b)

Capítulo 3

Processo de Desenvolvimento da Impressora 3D

3.1 Introdução

Este capítulo irá tratar toda a fase de desenvolvimento e conceptualização de uma nova impressora 3D com a capacidade de impressão através de materiais em forma de granulado. Numa primeira fase será feito um estudo de mercado de modo a identificar potenciais competidores e numa segunda fase, são expostas as necessidades e opiniões de vários utilizadores sobre o novo conceito a desenvolver. É ilustrada a metodologia utilizada na identificação das necessidades de utilizadores típicos e o modo de interação com os mesmos. Posteriormente, são expostas todas as ferramentas utilizadas, características de um projeto de engenharia de produto, tendo como base metodologias atualmente estabelecidas e de acordo com Completo (2012) como referência.

3.2 *Benchmarking*

O *Benchmarking* é um método que permite avaliar comparativamente um produto, empresa ou organização face à sua concorrência. De uma forma resumida, o *benchmarking* consiste na procura de melhores métodos utilizados nos diferentes processos de negócio e nas funções empresariais, com especial ênfase naquelas que permitem assegurar e sustentar vantagens competitivas. Este método pode ser usado por empresas, independente da sua dimensão, cujo seu setor de atividade pode ser distinto (Rios, 2014). No contexto de desenvolvimento de um produto, o *benchmarking* permite, em primeiro lugar, identificar as empresas ou instituições tidas como referência do setor, ou seja, as empresas que produzem determinado produto ou fornecem determinado serviço com um máximo de lucro aliado a um elevado grau de satisfação dos consumidores (Dieter, 2000).

Neste capítulo serão abordadas quais as especificações dos produtos, a marca e o

preço de forma a compreender o que existe no mercado. Neste projeto é efetuado o estudo sobre as diferentes impressoras 3D com alimentação por material granulado disponíveis atualmente no mercado.

Após a análise de mercado foram selecionados os produtos mais importantes com objetivo de estudar as diferentes soluções já existentes no mercado em termos de design, tecnologia, materiais, peso, volume, modo de fabrico, entre outras características. As páginas seguintes ilustram os produtos analisados, bem como as suas principais características.

3.2.1 Impressoras 3D com alimentação por granulado

O produto que se segue é, atualmente no mercado, o único produto totalmente de acordo com o projeto a desenvolver.

David

Sculptify é uma empresa americana de produção de impressoras 3D, que desenvolveu um novo método de impressão, FLEX (*Fused Layer Extrusion*), que permite aos utilizadores imprimir com material granulado, havendo assim uma opção de materiais quase ilimitada e a um menor custo. Esta impressora denomina-se por David e apresenta um volume de construção de 200 x 220 x 185 mm e uma resolução máxima de 100 μm . Conta ainda com mesa aquecida, que pode chegar até aos 200 °C. Suporta uma elevada gama de materiais como ABS, PLA, Nylon, HDPE, EVA, TPU, HIPS, PC, compósito de madeira, entre outros (Sculptify, 2016). Na Tabela 3.1 apresenta-se resumidamente as especificações deste produto.

Como já foi referido, este produto, apresentado na Figura 3.1, é atualmente o mais equiparável ao produto a desenvolver.



Figura 3.1: Modelo da impressora David.
Adaptado de Sculptify (2016).

Tabela 3.1: Especificações da impressora David.

Especificações	David
Tecnologia	FLEX (<i>Fused Layer Extrusion</i>)
Velocidade de impressão (mm/s)	10 - 150
Resolução da impressão (μm)	100
Volume de impressão (mm)	200 x 220 x 185
Temperaturas admissíveis pelo extrusor ($^{\circ}\text{C}$)	330
Temperaturas admissíveis da cama quente ($^{\circ}\text{C}$)	200
Dimensões do produto(mm)	538 x 502 x 620
Precisão de posicionamento no eixo Z (μm)	3
Precisão de posicionamento nos eixos XY (μm)	8
Capacidade de armazenamento de material (kg)	0,56
Motores de passo	Passo de 1.8° com mínimo de 1/16 micro-passos
Materiais de construção	Alumínio, Polycarbonato
Conectividade	USB
Custo (€)	2 460

3.2.2 Impressoras 3D com tecnologia FDM

Paralelamente à análise do produto equiparável, David, foram também estudadas impressoras de tecnologia FDM. De seguida serão apresentados os principais produtos analisados deste segmento. Em anexo segue uma tabela comparativa dos produtos seguintes (Ver Anexo A).

3.2.3 Makerbot Replicator

Makerbot Replicator é um produto da empresa americana Makerbot fundada em 2009 por Bre Pettis, Adam Mayer e Zhach Smith para a produção de impressoras 3D. Os seus primeiros produtos foram vendidos como *kits opensource*, requerendo pouco esforço para a montagem. Mais tarde começaram a ser desenvolvidos como produtos com pouco ou até nenhum cariz de personalização por parte do utilizador (Hughes, 2014).

Em janeiro de 2014, a empresa lança ao público o produto aqui em análise, a quinta geração Makerbot Replicator, Figura 3.2. Este produto apresenta um volume de construção de 252 x 199x 150 mm e uma resolução máxima de 100 μm . Conta também com um *design* robusto, uma câmara de monitorização, conexão Wi-Fi e Ethernet, possibilidade de controlo da impressora por uma aplicação de telemóvel. Suporta materiais desde ABS, PLA, HDPE, PVA, entre outros (Hughes, 2014; Makerbot, 2016).



Figura 3.2: Modelo da impressora Makerbot Replicator.
Adaptado de Makerbot (2016)

3.2.4 Ultimaker 2+

A Ultimaker é uma empresa holandesa de fabrico de impressoras 3D que foi fundada em 2011 por Martijn Elserman, Erik de Bruijn, e Siert Wijnia. A empresa começou inicialmente como uma empresa de impressoras *open-source* mas contrariamente ao projecto RepRap fundado por Adrian Bowyer, a empresa não se foca num objetivo de própria replicação. Em vez disso a Ultimaker tem como objetivo de fazer impressoras 3D de alta qualidade, disponibilizando *kits* ou produtos pré-montados. A gama de produtos disponibilizados por esta empresa inclui a gama Ultimaker, onde se integra o produto em análise, Ultimaker 2+, apresentado na Figura 3.3. A este produto foi atribuído o primeiro lugar pela revista Make Make (2015) na categoria de melhor impressora 3D de grandes dimensões. Este produto apresenta um volume de construção de 223 x 223 x 305 mm e uma resolução máxima de 20 μm . Suporta materiais como ABS, PLA, Nylon, contudo estes dois últimos não recomendados pela empresa (Make, 2015; Ultimaker, 2016).

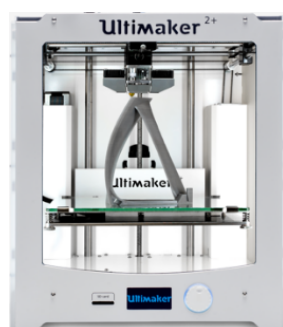


Figura 3.3: Modelo da impressora Ultimaker 2+.
Adaptado de Ultimaker (2016)

3.2.5 Prusa Hephestos 2

A Prusa Hephestos 2 é um produto da empresa espanhola BQ que produz equipamentos eletrotécnicos, desde *smartphones*, *e-readers* e impressoras 3D, fundada em 2009. A Prusa Hephestos 2, apresentada na Figura 3.4, é uma impressora *DIY* (*Do it yourself*), que em português significa faça você mesmo. Esta baseada na Prusa i3, um dos modelos mais populares da comunidade RepRap, mas, no entanto foi construída de modo à obtenção de uma impressora profissional mantendo o aspeto original. Este produto apresenta um volume de impressão 210 x 297 x 220 mm e uma resolução máxima de 50 μm . Suporta materiais como PLA, compósitos (madeira, bronze, cobre) e Filaflex. (BQ, 2016b).



Figura 3.4: Modelo da impressora Prusa Hephestos 2.
Adaptado de BQ (2016b)

3.2.6 Lulzbot TAZ 5

Lulzbot é uma linha, onde se insere a Luzbot TAZ 5, de produto pertencente a empresa Aleph Objects, que tem como modelo empresarial o desenvolvimento de equipamentos *open-source* para impressoras 3D com total suporte em *software* livre e gratuito. Esta empresa foi fundada em janeiro de 2011 em Loveland, Colorado, Estados Unidos da América (Aleph Objects, 2016).

Esta empresa é conhecida pela sua linha de impressoras 3D Lulzbot, porém, mesmo utilizando guias de alumínio extrudido e outros componentes para produção em massa, ainda continua fiel aos princípios RepRap por ter componentes que possam ser replicados através da impressão 3D.

Dado à sua estrutura, *software* e *design* serem totalmente *open-source*, a Luzbot TAZ 5 recebeu o certificado *Respects Your Freedom* da *Free Software Foundation* (Pirjan e Petrosanu, 2013). A este produto foi também atribuído o primeiro lugar pela revista Make Make (2015) na categoria de melhor impressora 3D na generalidade. Este produto apresenta um volume de impressão 290 x 275 x 250 mm e uma resolução máxima de 75 μm e suporta materiais como PLA, compósitos (madeira, bronze, cobre), Nylon, entre outros (Aleph Objects, 2016).

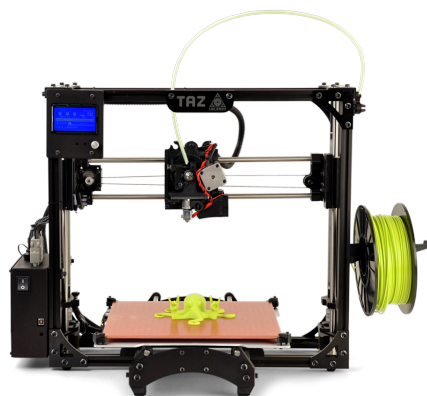


Figura 3.5: Modelo da impressora Lulzbot TAZ 5.
Adaptado de Aleph Objects (2016)

3.2.7 Makergear M2

A Makergear é uma empresa fundada em Beachwood, Ohio e é a produtora do produto em análise, Makergear M2. Foi fundada com o objetivo de obter melhores produtos de impressão 3D, melhor serviço ao cliente e fornecer a melhor experiência possível ao utilizador (3D Hubs, 2016a; Makergear, 2016).

A Makearegear M2, apresentada na Figura 3.6, foi desenvolvida de forma a obter uma ótima performance, uma vez que a sua estrutura é totalmente em aço permite uma alta robustez ao produto. Contudo, dada aos seus componentes serem de qualidade e à presença de guias de alta precisão é possível a obtenção de peças impressas de alta precisão e qualidade (3D Hubs, 2016a). Este produto vem equipado com um volume de impressão de 203 x 254 x 203 e pode atingir resolução máxima de 50 μm . Suporta materiais como PLA, ABS, PET, HIPS, HDPE, TPU (filamentos flexíveis), Policarbonato, compósitos entre outros (3D Hubs, 2016a; Makergear, 2016).

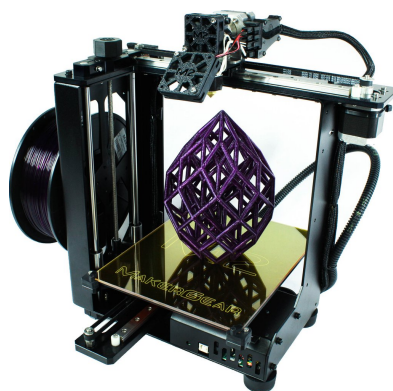


Figura 3.6: Modelo da impressora MakerGear M2.
Adaptado de (Makergear, 2016)

3.2.8 FlashForge Creator Pro

FlashForge Creator Pro, apresentada na Figura 3.7, é um produto da empresa FLASH-FORGE USA, fundada em 2011. A empresa foca-se em tornar a impressão 3D acessível para todo o tipo de clientes assim como instituições, arquitetos, engenheiros, *designers* e a todo mercado consumidor. Também se compromete a criar valor para os seus consumidores por disponibilizar produtos de qualidade, fidedigno e a preços competitivos (Flashforge Creator USA, 2016). A FlashForge Creator Pro conta com *Software* e *Hardware open-source* e apresenta um volume de impressão de 225 x 145 x 150, uma resolução máxima de 100 μm e um duplo extrusor. Suporta um variado número de materiais tais como ABS, PLA, nylon, materiais compósitos entre outros (3D Hubs, 2016a).

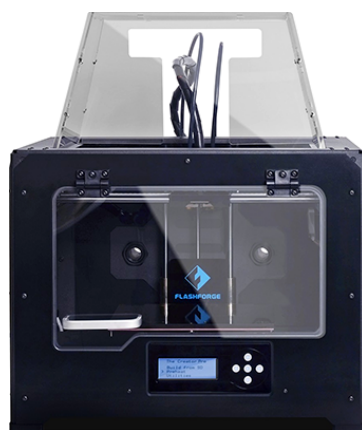


Figura 3.7: Modelo da impressora FlashForge Creator Pro.
Adaptado de (3D Hubs, 2016a)

3.2.9 BEETHEFIRST

A primeira impressora 3D completamente desenvolvida e produzida em Portugal, BEETHEFIRST, foi criada pela BEEVERYCREATIVE. Os fundadores Francisco Mendes e Jorge Pinto propuseram-se a criar uma impressora 3D que fosse simples de usar, de baixo peso e dimensões reduzidas, que fosse portátil e que fosse silenciosa. O objetivo era criar um equipamento de *click and print*, onde a criação de um objeto 3D está à distância de um clique (Ferreira, 2013). BEETHEFIRST, apresentada na Figura 3.8, apresenta um volume de impressão de 190 x 135 x 125, uma resolução máxima de 50 μm e suporta somente um material para impressão, o PLA.



Figura 3.8: Modelo da impressora FlashForge Creator Pro.
Adaptado de (3D Hubs, 2016a)

3.3 Identificação das necessidades do Cliente

A identificação das necessidades dos consumidores é parte integrante de um processo de desenvolvimento do produto, constituindo uma etapa essencial de todo o projeto. A identificação das necessidades e requisitos permite que estes se traduzam em atributos e funcionalidades do produto (Eppinger e Ulrich, 2000). Isto é essencial para alcançar um nível de satisfação maior do cliente, pois influencia o sucesso do produto e a disponibilidade que este está disposto a pagar por ele (Ibusuki e Kaminski, 2007; Ulrich, 1995).

Nesta fase do projeto foram recolhidas as potenciais necessidades do cliente, focando-se apenas e exclusivamente nessas, de forma a nenhuma delas ser esquecida ou desvalorizada durante o desenvolvimento do mesmo.

No contexto de desenvolvimento de um novo produto, ou no melhoramento, re-design e re-função de um já existente, existem várias formas de identificação das preferências dos consumidores. Destes destacam-se: questionários, entrevistas, observação direta no ambiente do produto, entre outros. Com o intuito de delinear um caminho na geração do novo conceito de Impressora 3D, e por outro lado conhecer um conjunto diversificado de opiniões de usuários de um modo relativamente rápido e simples, foi criado um questionário online, apresentado no Anexo B, através da tecnologia *Google Forms* e posteriormente divulgados num Grupo de Impressão 3D numa rede social ¹. É também de notar que foi tida em conta informação contida em outros sites e fóruns para a identificação destas necessidades. O inquérito é constituído por 8 perguntas. Através desse método foi possível recolher quais os fatores que influenciam os possíveis clientes/compradores, assim como quais as necessidades destes, referentes à impressora 3D a ser posteriormente desenvolvida.

¹<https://www.facebook.com/groups/1411601892410539/>

3.3.1 Interpretação dos Dados

De maneira a conseguir entender quais as necessidades e fatores mais relevantes para o cliente foram analisadas todas as respostas, também com o intuito de obter posteriormente os requisitos de produto. De referir que responderam ao questionário 32 pessoas.

Com a primeira e segunda questão foi possível identificar qual o intervalo de idades e género dos inquiridos. A Tabela 3.2 apresenta assim essa informação, destacando que existe uma maior utilização desta tecnologia por pessoas entre os 20 e os 30 anos.

Tabela 3.2: Intervalo de idades dos inquiridos.

Idades	Nº	Frequência [%]
Menor que 20	3	9%
Menor que 30	11	34%
Menor que 40	8	28%
Menor que 50	9	25%
Menor que 60	1	3%

Com a terceira questão foi possível identificar qual o tipo de utilização que o inquirido dá ao seu equipamento. Destacam-se nessa utilização a materialização de ideias e prototipagem, observável na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Respostas obtidas para a primeira questão do inquérito.

Uso da Impressão 3D	Nº de Respostas	Frequência [%]
Materialização de ideias e conceitos	23	71,88%
Protótipos	17	53,13%
Produção	14	43,75%
Arte	13	40,63%
Moda	10	31,25%
<i>Hobby</i>	10	31,25%
Educação	7	21,88%
Amostras	5	15,63%
Outro	3	9,38%

No que diz respeito às quatro perguntas seguintes é possível saber em concreto as necessidades do cliente, pois estas questões visam a obter os fatores ou funções preferências assim como outros fatores relevantes para a aquisição do produto. Na Tabela 3.4 estão apresentadas as respostas dos inquiridos, respostas estas que vão ser posteriormente convertidas em requisitos de cliente.

Tabela 3.4: Necessidades do Cliente

Necessidade do Cliente
"Ser rápida"
"Boa resolução"
"Fiabilidade"
"Construção simples"
"Qualidade de construção da impressora"
"Preço/Qualidade"
"Maior precisão"
"Facilidade de Manutenção"
"Tamanho de impressão"
"Qualidade de impressão"
"Vários tipos de plástico imprimível"
"Simplicidade de uso"
"Fácil substituição da extrusora"
"Maior facilidade de acesso ao extrusor para limpeza"
"Impressão em ambiente fechado"
"Possibilidade de impressão através de granulado ou por fio"
"Impressão através granulado"
"Redução de ruído"
"Redução de vibrações"
"Aspeto agradável"
"Pouca manutenção e avarias"
"Simplicidade de uso em sala de aula com crianças dos 10 aos 14 anos"
"Cor da Impressora"
"Cama Aquecida"
"Unidade Extrusora mais compacta"
"Reforço Anti-Folga no eixo Z (<i>Anti Backlash</i>)"
"Um software melhor"
"Proteções no extrusor"
"Acesso seguro por parte do utilizador"

Por fim a última pergunta questiona os inquiridos sobre o preço a que estariam dispostos a pagar pelo produto. Na Tabela 3.5 está apresentada a fasquia de valores respondidos. Sendo o valor mínimo e máximo respondido de 400 e 2000 euros, respetivamente. O Valor médio é de 900 euros, valor este que, posteriormente, será tido em conta para o desenvolvimento do produto.

Tabela 3.5: Intervalo de preços que os inquiridos estão dispostos a pagar pela impressora 3D.

Preço	Nº	Frequência [%]
Menor que 500	7	22%
Menor que 1000	16	50%
Menor que 1500	7	22%
Menor que 2000	1	3%
Igual a 2000	1	3%

3.3.2 Organização dos Dados

Após a fase de interpretação das necessidades, gostos e preferências dos utilizadores e o conhecimento de um conjunto vasto de opiniões, procedeu-se a uma organização de toda a informação. Os dados recolhidos nos questionários foram organizados de forma a converter as necessidades em requisitos do cliente, mostrado na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Conversão das necessidades do cliente em requisitos do cliente.

Necessidades do Cliente	Requisitos do Cliente
"Facilidade de manutenção"	Fácil manutenção
"Fácil substituição da extrusora"	
"Maior facilidade de acesso ao extrusor"	
"Simplicidade de uso em sala de aula com crianças dos 10 aos 14 anos"	Fácil de operar
"Simplicidade de uso"	
"Preço/Qualidade"	Preço acessível
"Aspeto agradável"	Design/ Aspeto apelativo
"Cor da impressora"	
"Unidade Extrusora mais compacta"	
"Qualidade de construção da impressora"	Maior robustez
"Construção simples"	
"Fiabilidade"	
"Pouca manutenção e avarias"	Pouca manutenção
"Cama aquecida"	Melhor aderência à cama
"Redução de ruído"	Redução de ruídos e vibrações
"Redução de Vibrações"	
"Impressão em ambiente fechado"	Performance
"Ser rápida"	
"Maior precisão"	
"Reforço anti-folga no eixo Z (<i>Anti-Backlash</i>)"	
"Um software melhor"	
"Boa resolução"	Diminuição de processos de acabamento após impressão
"Tamanho de impressão"	
"Qualidade de impressão"	
"Vários tipos de plástico imprimível"	Impressão de vários tipos de plástico
"Possibilidade de impressão através de granulado ou por fio"	Capacidade simultânea de impressão de granulado ou de fio.
"Impressão através de granulado"	
"Proteções no extrusor"	Proteções
"Acesso seguro por parte do utilizador"	

3.4 Hierarquização dos Requisitos

Após terem sido identificados os requisitos dos consumidores, o próximo passo consiste numa hierarquização dos mesmos, de modo a estabelecer uma ordem de valor, para o efeito foi estabelecida uma tabela com os requisitos e suas designações, Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Requisitos e respetiva designação.

Requisito	Designação
Fácil Manutenção	A
Fácil de Operar	B
Preço Acessível	C
Design/ Aspeto Apelativo	D
Maior Robustez	E
Pouca Manutenção	F
Melhor aderência à cama	G
Redução de ruídos e vibrações	H
Performance	I
Diminuição de processos de acabamento após impressão	J
Impressão de vários tipos de plástico	K
Capacidade simultânea de impressão por granulado ou por fio	L
Proteções	M

3.4.1 Diagrama de Mudge

O diagrama de Mudge consiste numa ferramenta que permite avaliar as funções por ordem de importância que estas representam para o cumprimento das exigências dos utilizadores. Esta técnica permite comparar todas as combinações possíveis das funções, duas a duas, definindo qual a função mais importante através da atribuição de um nível de importância, Tabela 3.8 (Csillag, 1995).

Tabela 3.8: Nível de Importância.

Escala de Importância	
0	Igual Importância
1	Pouco mais importante
2	Mais Importante

De uma forma resumida, o diagrama de Mudge compara os requisitos entre si, definindo qual o requisito que contribui para o sucesso do produto e quanto mais importante é esse requisito (Rios, 2014).

Na Figura 3.9, ilustra-se o diagrama de Mudge do projeto. O nível de importância atribuído a cada requisito, quando comparado com os restantes, foi feito tendo em consideração os resultados obtidos nos questionários realizados.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Soma	%	Importância
A	B2	C2	A1	E2	A0	G1	H1	I2	J3	K2	L3	M1	1	1,15	12
	B	C1	B2	E1	B0	G1	B0	I2	J3	K1	L3	M2	4	4,60	7
		C	C2	E1	C1	C0	C0	I1	J1	K2	L2	C1	7	8,05	6
			D	E2	F2	D1	H1	I2	J2	K2	L2	M1	1	1,15	13
				E	E1	E1	E0	E0	E0	E1	E0	E1	10	11,49	4
					F	F1	F0	I1	J1	F0	F0	F1	4	4,60	8
						G	G0	I1	J1	G1	L1	G0	3	3,45	10
							H	I1	J1	H0	L1	H1	3	3,45	11
								I	I0	I1	I1	I1	13	14,94	2
									J	J1	J1	J2	16	18,39	1
										K	K0	K2	9	10,34	5
											L	M0	12	13,79	3
												M	4	4,60	9
												Total	87	100	

Figura 3.9: Diagrama de Mudge.

Após a construção do diagrama de Mudge, os requisitos foram hierarquizados atendendo à importância relativa (expressa em percentagem) de cada um, Figura 3.10.

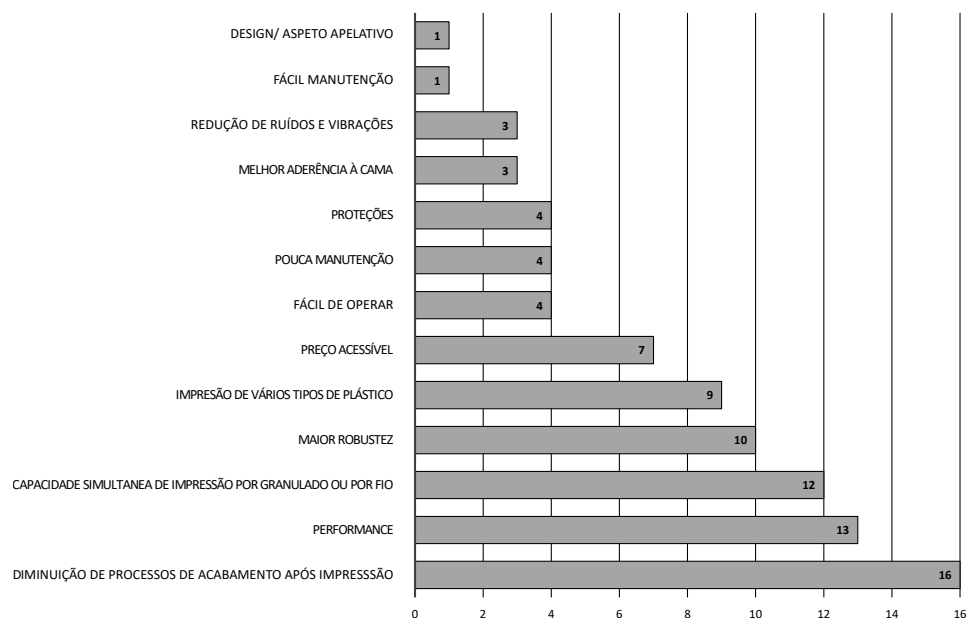


Figura 3.10: Priorização dos Requisitos do Cliente.

Após a hierarquização realizada dos requisitos, é feita uma divisão dos mesmos em graus de importância entre 1 (pouco importante) a 5 (muito importante), ilustrada na Tabela 3.9. Esta divisão será contemplada na fase de construção da matriz QFD .

Tabela 3.9: Grau de Importância dos requisitos.

Ordem	Letra	Requisito do Cliente	Soma	%	Importância	Valor
1	J	Diminuição de processos de acabamento após impressão	16	18,39	1	5
2	I	Performance	13	14,94	2	5
3	L	Capacidade simultânea de impressão por granulado ou por fio	12	13,79	3	5
4	E	Maior Robustez	10	11,49	4	4
5	K	Impressão de vários tipos de plástico	9	10,34	5	4
6	C	Preço Acessível	7	8,05	6	4
7	B	Fácil de Operar	4	4,60	7	3
8	F	Pouca Manutenção	4	4,60	8	3
9	M	Proteções	4	4,60	9	3
10	G	Melhor aderência à cama	3	3,45	10	2
11	H	Redução de ruídos e vibrações	3	3,45	11	2
12	A	Fácil Manutenção	1	1,15	12	1
13	D	Design/ Aspeto Apelativo	1	1,15	13	1

3.4.2 Diagrama de Kano

O diagrama de Kano é uma ferramenta de medição da qualidade utilizada para categorizar e priorizar as necessidades dos clientes com base na influência que estas provocam na satisfação do cliente Hill (2012). A análise de Kano, normalmente designada por diagrama de Kano, consiste num método gráfico de medição da qualidade para categorizar e priorizar as necessidades e requisitos do cliente (Lee e Huang, 2009).

De uma forma resumida, o pressuposto subjacente à análise de Kano é que a satisfação do cliente nem sempre é proporcional à forma totalmente funcional do produto. Por outras palavras, maior qualidade não conduz necessariamente a uma maior satisfação para todos os atributos ou especificações do produto. Ou seja, combinando o desempenho do produto com o nível de satisfação do cliente, é determinado o efeito que a variação da capacidade de resposta a um determinado requisito provocará no nível de satisfação do cliente (Lee e Huang, 2009). A análise de Kano distingue três tipos de requisitos de produto que influenciam a satisfação do cliente em diferentes modos (Lee e Huang, 2009).

Requisitos Básicos: são os requisitos que obrigatoriamente têm de estar presentes no produto, ou seja, a sua ausência provoca grande insatisfação no cliente. Por outro lado, e uma vez que o cliente associa estes requisitos como "garantidos" no produto, a sua presença não contribui para o aumento da sua satisfação. Os requisitos básicos constituem, em diversas situações, um fator competitivo, uma vez que a sua ausência no produto conduz a um desinteresse do cliente.

Requisitos uni-dimensionais ou esperados: constituem o grupo de requisitos que podem aumentar ou diminuir o grau de satisfação do cliente consoante o seu maior ou menor nível de desempenho. Na maioria dos casos, estes requisitos são explicitamente exigidos pelo cliente.

Requisitos inesperados ou de excitação: estes requisitos constituem os critérios de produto que têm maior influência sobre o grau de satisfação de um cliente sobre determinado produto. De facto, o cliente não associa estes requisitos ao produto. Contudo, a sua presença conduz a um elevado grau de satisfação do cliente. Estes requisitos, normalmente, não são mencionados pelo cliente e a sua ausência no produto não provoca qualquer insatisfação.

Na Figura 3.11 encontra-se demonstrado o diagrama de Kano do projeto. A medida do desempenho de determinado requisito e a satisfação do cliente são indicadas no eixo das abcissas e das ordenadas, respetivamente. A categorização dos requisitos foi feita com base nos dados obtidos dos questionários realizados na Secção 3.3 .

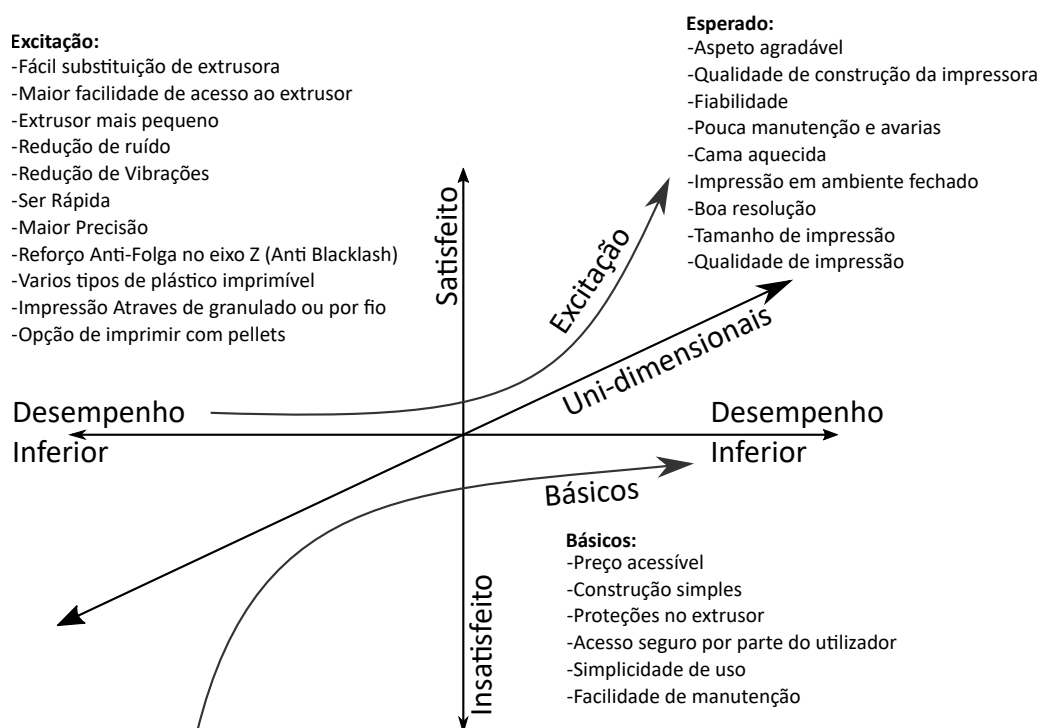


Figura 3.11: Diagrama de Kano do projeto.

3.5 Estabelecimento dos Requisitos do Produto

Após a interpretação e hierarquização dos requisitos do cliente, é necessário a conversão dos mesmos em atributos e especificações do produto. Estas especificações/requisitos visam proporcionar o melhor meio de resposta às necessidades definidas pelo cliente, desta forma torna-se fulcral realizar uma boa conversão de requisito cliente para requisito produto tendo em conta que posteriormente serão estabelecidas relações entre os mesmos na construção da casa de qualidade. Na Tabela 3.10 estão apresentados os requisitos definidos, assim como, a grandeza correspondente.

Tabela 3.10: Requisitos do produto e suas grandezas.

Especificações do produto	Grandeza
Velocidade de impressão	mm/s
Resolução da impressão	μm
Volume de impressão	mm^3
Temperaturas admissíveis pelo extrusor	$^{\circ}\text{C}$
Tamanho do granulado	mm
Diâmetro de extrusão	mm
Altura da impressora	mm
Largura da impressora	mm
Comprimento da impressora	mm
Altura do extrusor	mm
Largura do extrusor	mm
Comprimento do extrusor	mm
Peso da impressora	kg
Potência de aquecimento do extrusor	W
Precisão de Posicionamento no Eixo Z	μm
Precisão de Posicionamento no Eixo XY	μm
Capacidade de armazenamento de material	kg
Velocidade de extrusão	mm/s
Custo	€

3.6 Casa da Qualidade(QFD)

A casa da qualidade, QFD (*Quality Function Deployment*), é uma ferramenta imprescindível para o desenvolvimento de novos produtos, pois permite interligar todos os processos, ferramentas e recursos utilizados anteriormente. Esta pode ainda ser definida como a matriz que executa o projeto da qualidade, organizando as qualidades/necessidades exigidas pelo cliente convertendo-as em requisitos do produto e mostrando correlações entre estes últimos, isto é, a casa da qualidade pode ser vista como um sistema, no qual a entrada é a voz do cliente, e a saída as especificações e características de engenharia de um produto, (Akao, 1996; Eppinger e Ulrich, 2000).

Para além de inter-relacionar estas informações, será também realizada uma análise com base nos produtos da concorrência presentes no *benchmarking*. Desta forma serão interpretados os dados da matriz QFD, no Anexo C, o que permitirá reconhecer e identificar quais as oportunidades e pontos menos favoráveis do produto.

Numa primeira fase preencheu-se a matriz de relações entre as especificações do produto e os requisitos do cliente, podendo as relações entre estes serem consideradas fortes (9), médias ou moderadas (3) e por fim fracas (1), Figura 3.12.

	Velocidade de impressão	Resolução da impressão	Volume de impressão	Temperaturas admissíveis pelo extrusor	Tamanho do granulado	Diâmetro de extrusão	Altura da impressora	Largura da impressora	Comprimento da impressora	Altura do extrusor	Largura do extrusor	Comprimento do extrusor	Peso da impressora	Potência de aquecimento do extrusor	Precisão de Posicionamento no Eixo Z	Precisão de posicionamento nos eixos XY	Capacidade de armazenamento de material	Velocidade de extrusão	Custo
<div>Correlação entre requisitos de cliente e de produto</div> <div> <div>○ Forte</div> <div>○ Moderado</div> <div>△ Fraco</div> </div> <div>9</div> <div>3</div> <div>1</div>																			
Fácil manutenção							△	△	△	△	△	△							
Fácil de operar						△	△	△	△	△	△	△							
Preço acessível		○	○	△	1	○	3	3	3	△	△	△	1		△	△		△	○
Proteções			△	1						△	△	△	1	○	3	△			9
Maior robustez	○	3					9	9	9				○	9	△	1	1	○	3
Pouca manutenção	△	1																△	1
Melhor aderência à cama	○	3	3												○			○	3
Redução de ruídos e vibrações	○	9				△	1	1	1	△	△	△	1		○	3	3	3	△
Performance	○	9	9		△	1	9								○	9	9	○	9
Impressão de vários tipos de plástico	△	△		○	○	○				○	○	○		○	○			○	○
Capacidade simultânea de impressão de granulado ou de fio	△	1	1	9	9	3	△	△	△	△	9	9	9	○	9	○	○	3	3
	1			3		3	1	1	1	1	1	1	1	3	1		9		3
Design/ Aspetto apelativo		○	△	△			3	3	3	3	3	3	3	1			3		1
Diminuição de processos de acabamento após impressão		9	1	1		3									9	9		1	9
Grau de importância (req. produto)	220	256	45	168	120	227	170	170	170	153	153	153	162	126	241	241	214	135	413
Percentual	6	7	1	5	3	6	5	5	5	4	4	4	5	4	7	7	6	4	12
Unidade	mm/s	μm	mm³	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg	μm	μm	kg	mm/s	€

Figura 3.12: Matriz relações requisitos de cliente/requisitos do produto.

O próximo passo é fazer a avaliação competitiva e argumentos de venda. Nesta fase são inseridos os dados provenientes da análise da concorrência. Esta avaliação permite identificar pontos fortes/fracos em relação à concorrência, que podem ser considerados como vantagem ou pontos de melhoria, respetivamente. Para esta avaliação as marcas consideradas como principais concorrentes foram: *David*, *Prusa I3 Hephastos 2*, *Lulzbot TAZ 5*, *Ultimaker 2+*, *Makerbot Replicator* e *Makergear M2*. A pontuação para a avaliação dos requisitos vai de 1 a 5, sendo 1 pior e 5 melhor, correspondendo ao nível de resposta dada pelo fabricante a cada necessidade do cliente. Por fim considerando a quantificação dos requisitos da concorrência, são definidos e apresentados quais os valores para cada especificação do produto definidos anteriormente. A análise efetuada encontra-se na Figura 3.13.

			Bechmarking de Mercado															
			Cliente	Kano (interno)	Grau de importância (geral)	Nosso Produto						Plano	Índice de melhoria	Argumento de vendas	Peso absoluto	Peso relativo		
						David	Prusa i3 Hephestos 2	Lulzbot TAZ 5	Ultimaker 2+	Makerbot Replicator	Makergear M2							
RC: Requisitos do Cliente	Simplista	Fácil manutenção	1	L	2	3	4	3	4	4	5	4	3	1,0	1,0	2,0	3,8	
		Fácil de operar	3	L	3	4	4	4	4	5	5	4	4	1,0	1,0	3,0	5,6	
	Custo	Preço acessível	4	L	4	4	2	4	3	3	3	3	4	1,0	1,0	4,0	7,5	
		Segurança	Proteções	3	L	2	5	5	4	4	5	5	4	3	0,6	1,0	1,2	2,3
	Conforto e Desempenho	Maior robustez	4	O	5	4	5	3	5	4	4	5	5	1,3	1,0	6,3	11,7	
		Pouca manutenção	3	O	3	3	4	4	5	4	3	5	3	1,0	1,0	3,0	5,6	
		Melhor aderência à cama	2	O	2	4	5	3	4	4	3	4	4	1,0	1,0	2,0	3,8	
		Redução de ruídos e vibrações	2	E	2	4	4	3	3	5	4	3	4	1,0	1,0	2,0	3,8	
	Versatilidade	Performance	5	E	5	4	5	3	5	4	5	5	5	1,3	1,0	6,3	11,7	
		Impressão de vários tipos de plástico	4	E	4	4	5	3	5	3	4	5	5	1,3	1,2	6,0	11,3	
		Capacidade simultânea de impressão de granulado ou de fio	5	E	5	4	1	1	1	1	1	1	5	1,3	1,5	9,4	17,6	
	Aparência	Design/ Aspeto apelativo	1	O	2	3	4	3	3	4	5	3	3	1,0	1,0	2,0	3,8	
	Acabamentos	Diminuição de processos de acabamento após impressão	5	O	5	4	4	5	3	5	4	5	5	1,3	1,0	6,3	11,7	
															53,3	100		

Figura 3.13: Análise competitiva e argumentos de venda.

De seguida foi necessário quantificar as especificações do produto comparando os seus valores. Assim, e de forma a tentar enquadrar e posicionar o produto a ser desenvolvido, são definidos quais os valores alvo a serem atingidos. A definição dos valores alvo é estipulada através da comparação entre os produtos da concorrência. O objetivo é identificar áreas de sub e sobre dimensionamento que não representam vantagens em relação à concorrência e devem ser aspetos a melhorar. A quantificação dos requisitos do produto encontra-se representada na Figura 3.14.

		Unidade	mm/s	µm	mm³	°C	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kg	W	µm	µm	kg	mm/s	€
Bechmarking Técnico de Produto	David	150	100	200x220x185	330	-	0,4	620	502	538	-	-	-	-	29	-	3	8	0,56	-	2460
	Prusa i3 Hephestos 2	200	50	210x 297x220	250	-	0,4	661	605	450	75	85	65	16	40	-	-	-	1	40	850
	Lulzbot TAZ 5	200	30	290x275x250	300	-	0,5	515	680	520	-	-	-	11	-	-	-	-	-	1665	
	Ultimaker 2+	300	20	223x223x205	286	-	0,4	588	342	493	-	-	-	11,3	-	5	12,5	0,75	35	1895	
	Makerbot Replicator	-	100	252x199x150	-	-	-	410	441	528	-	-	-	16	-	2,5	11	-	-	1790	
	Makergear M2	200	50	200x250x200	300	-	0,4	420	610	533	-	-	-	12,7	40	-	-	1	35	1625	
Plano (valor meta)		200	50	200x200x200	280	3	0,4	500	450	450	150	50	50	10	40	3	11	0,5	40	900	

Figura 3.14: Análise da concorrência dos requisitos do projeto.

Já numa na fase final do preenchimento da matriz foi necessário determinar a matriz de correlações entre os requisitos do projeto e determinar o direcionamento da melhoria. As correlações podem ser positivamente fortes/fracas, negativamente fortes/fracas, ou inexistentes, consoante os requisitos em análise. O direcionador de melhoria é um fator que indica qual o sentido que o requisito deve tomar para responder às necessidades do cliente. Ou seja, há requisitos do produto cujo valor deve aumentar ou diminuir para agrado do cliente. Há situações onde a variação do mesmo não implica alteração no nível

de satisfação do cliente. A matriz de correlações definida para este projeto é demonstrada na Figura 3.15.

[illegible]

Figura 3.15: Matriz de correlações entre os requisitos do produto.

Da casa da qualidade é possível realizar nova hierarquização dos requisitos de cliente. Até então a hierarquização definida levava em linha de conta apenas as necessidades expressas e o modo como se relacionam entre si, através do diagrama de *Mudge*. A matriz QFD permite determinar o peso relativo de cada necessidade do cliente, tendo em consideração o grau de importância geral, o índice de melhoria (que relaciona as características atuais do produto com o plano previsto) e o argumento de vendas.

Deste modo, os requisitos serão ordenados por ordem decrescente do seu peso relativo, como demonstra a Figura 3.16. Outra informação útil obtida pela análise da matriz QFD é a importância de cada requisito do produto. Estes dados são obtidos pelo somatório da importância da relação de cada requisito. Quantificar a importância de cada requisito representa um método auxiliar de identificação dos principais requisitos do projeto, bem como um modo de os priorizar entre si. Não obstante, esta quantificação nunca deve substituir a avaliação qualitativa dos mesmos. Na Figura 3.17 está representada a hierarquização destes requisitos por ordem decrescente de importância percentual.

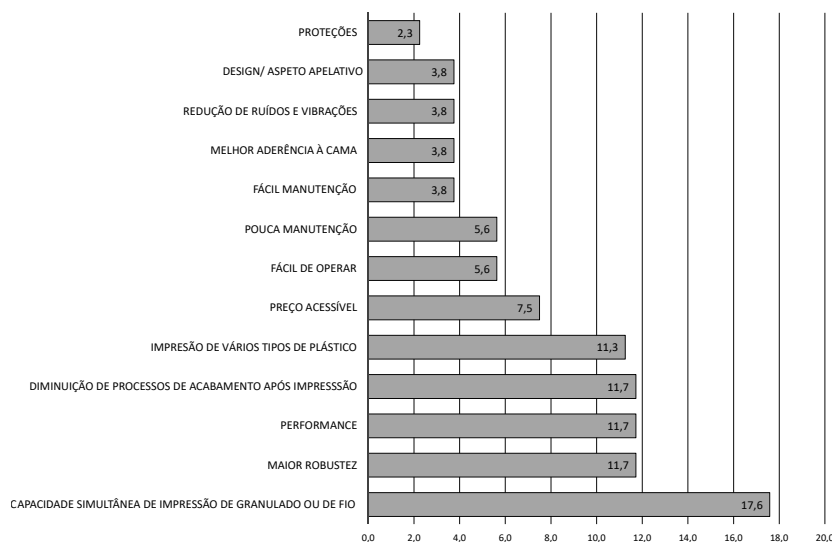


Figura 3.16: Peso relativo dos requisitos de cliente obtidos com base na matriz de qualidade.

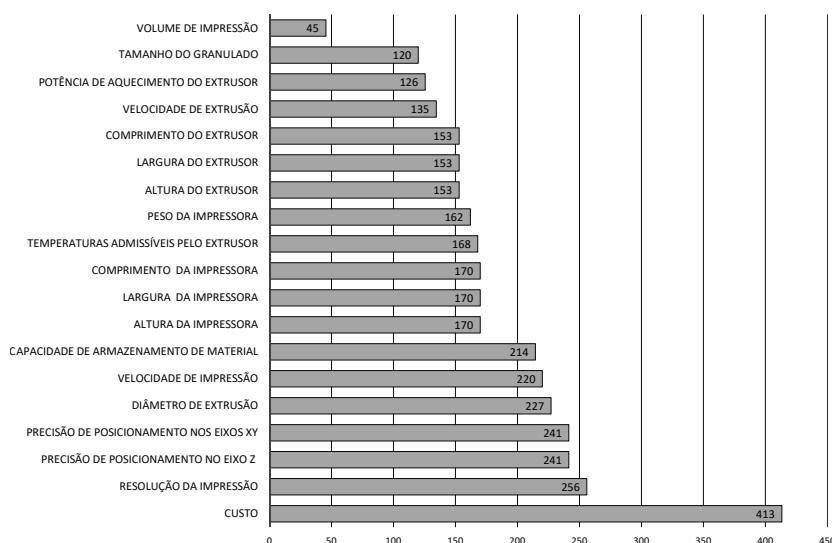


Figura 3.17: Gráfico da importância percentual dos requisitos do produto.

Com a hierarquização percebe-se que para os clientes o mais importante é: "Capacidade simultânea de impressão de granulado ou de fio"; "Performance"; "Maior robustez". Já o menos importante é: "Redução de ruídos e vibrações"; "Design/Aspetto Apelativo"; "Proteções". Em relação a hierarquização das especificações do produto deve ser dada mais atenção às seguintes especificações: "Custo"; "Resolução da impressão".

Após a obtenção da totalidade da matriz QFD (ver Anexo C), é necessário interpretar os dados obtidos da sua construção. De seguida serão analisados os aspectos mais importantes da matriz obtida.

- Relativamente à matriz de relações (ver Figura 3.12), não são detetadas linhas vazias. Isto é, não existem desejos do consumidor por satisfazer. Os requisitos do projeto satisfazem os diversos requisitos do cliente.
- Ainda analisando a matriz de relações, também não são detetadas colunas vazias. Caso isso acontecesse, seria um indicador de sobredimensionamento da impressora. Isto porque o produto pode até apresentar um elevado nível de resposta a uma determinada especificação, mas esta não será aproveitada pelo utilizador.
- Após elaboração da matriz de avaliação competitiva (ver Figura 3.13) é necessário analisar se existem ou não pontos críticos e/ou de conflito, bem como identificar as áreas de oportunidade do projeto e os aspetos obrigatoriamente a melhorar. Segundo Eppinger e Ulrich (2000) os pontos críticos referem-se aos requisitos de elevada importância para o cliente nos quais o produto a desenvolver se encontra abaixo da concorrência. Caso o requisito apresente elevada importância para o consumidor, estes pontos devem ser melhorados urgentemente. Na matriz obtida são detetados os pontos críticos relacionados com a robustez, impressão de vários tipos de material e melhor performance. Estes são aspetos que o cliente valoriza e a concorrência oferece soluções viáveis para estas necessidades.
- Os pontos de conflito significam que o requisito está abaixo na avaliação competitiva e acima da concorrência na avaliação técnica, este tipo de situação pode traduzir-se numa satisfação exagerada do requisito e este não ser aproveitado pelo utilizador. No projeto não existem pontos de conflito.
- Concernente à posição de mercado, são consideradas áreas de oportunidade situações onde a posição competitiva de mercado é débil, quer para a concorrência, quer para o produto a desenvolver. No caso de existirem requisitos com um grau de importância elevado, do ponto de vista do cliente, e o produto a ser desenvolvido apresente uma boa resposta e uma boa solução, estas características devem ser consideradas como argumentos de venda e de marketing. Neste projeto, a capacidade simultânea de impressão de granulado ou de fio e é tida como área de oportunidade, visto que a concorrência não apresenta grande resposta a este requisito. Uma vez que o tipo de projeto a ser desenvolvido apresentará uma vertente de impressão por fio assim como impressão por granulado, permitirá o uso deste em diversas situações sem comprometer a comodidade do consumidor. As áreas de oportunidades identificadas podem ser vistas como um estímulo para o consumidor pois oferecem características que outros produtos não possuem e estas são vistas como funções inesperadas que agradam pois trazem mais valor ao produto, ou seja, caso este requisito seja respondido de forma eficaz, para além de ampliar o número

de potenciais clientes, esta característica pode despoletar um novo interesse pelo produto, o que o torna mais versátil e mais apetecível para os mesmos.

- Tal como referem Eppinger e Ulrich (2000), a matriz da casa da qualidade deverá também evidenciar os pontos nos quais o produto apresenta deficiências, sendo assim necessário melhorar imperativamente estes aspetos para garantir que os mesmos não prejudicam o produto face à concorrência. Neste projeto, a facilidade de operação, facilidade de manutenção, redução de ruídos e de vibrações e design são aspetos indispensáveis de melhorar. Apesar de os requisitos referidos não terem sido reconhecidos como de elevada importância para o cliente, foi reconhecido que estes seriam um argumento de venda de grande influência. Dado que a concorrência apresenta superioridade nestes pontos, a melhoria destes requisitos é portanto uma condição indispensável para a garantia de competitividade no mercado.

3.7 Estudo e Considerações para o Projeto

Cálculo da Potência Necessária para o Aquecimento do Material

De acordo com o projeto RepRap (2016b), que é um projeto comunitário de máquinas que se auto-replicam utilizando a tecnologia FDM, o ABS é o material mais utilizado no FDM por ter melhores propriedades mecânicas que o HDPE, ser menos frágil que o PLA e ter o custo muito inferior ao PC, além da alta disponibilidade do produto no mercado na forma de filamento e de seu baixo coeficiente de fricção, necessitando de menos força para a extrusão e sendo mais adequado para peças pequenas. Portanto o ABS será o material base deste projeto. A temperatura de processamento também é muito dependente da exata composição do ABS, e de acordo com o livro *Handbook of Thermoplastics* (Olabisi e Adewale, 2016) a faixa de processamento do ABS é de 220°C a 260°C na câmara de fusão. A comunidade RepRap restringe ainda mais esta faixa para o processamento entre 220°C e 250°C. Sendo assim optou-se por uma temperatura média entre estes valores $T_{proc}=240\text{ }^{\circ}\text{C}$.

O dimensionamento térmico que será apresentado consiste na determinação das perdas de calor do cilindro de aquecimento, do calor demandado para o aquecimento do material para posterior seleção do elemento de aquecimento. O aquecimento elétrico é o método utilizado com maior frequência para o aquecimento da câmara de plastificação. Geralmente é possível assegurar a potência necessária e ainda garantir um adequado controle sobre a temperatura da cilindro utilizando um sensor de temperatura.

Para proceder ao dimensionamento térmico dos aquecedores, a convecção natural é o fenómeno considerado, uma vez que o ventilador não deve forçar o ar durante o aquecimento. Devido a um desenvolvimento matemático complexo, soluções analíticas não serão utilizadas neste trabalho, uma vez que não é esse o propósito do mesmo.

De acordo com (Incropera et al., 2011), "[...] o termo convecção é usado para descrever a transferência de energia entre uma superfície e fluido em movimento em torno da superfície. A convecção inclui a transferência de calor pelo movimento da massa fluida (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (condução ou difusão)". A convecção subdivide-se em natural ou forçada, sendo que na natural o movimento do fluido ocorre como consequência da variação de temperatura do fluido, e na forçada o movimento do fluido é imposto. A convecção forçada pode ser utilizada como uma técnica para controlar a temperatura da câmara, aumentando a troca de calor com o ambiente, e, consequentemente, diminuindo a temperatura da câmara. Um ventoinha é o método mais utilizado para forçar o movimento do ar.

Serão utilizadas as correlações empíricas de Churchill e Chu, recomendadas por (Incropera et al., 2011), para as geometrias imersas no fluido (escoamento externo). Por simplicidade, a geometria analisada será representada com um cilindro de raio externo de 6mm e comprimento 128mm. As propriedades do ar serão avaliadas na temperatura de filme (T_{filme}), definida pela equação 3.3. As equações 3.4 e 3.5 apresentam o número de Nusselt (\bar{Nu}_L) e a equação 3.6 o número de Rayleigh (Ra_L), necessárias para a correlação empírica. A equação 3.4 reproduz a correlação apresentada pela referência para uma placa vertical, que será utilizada para calcular o coeficiente de transferência de calor. Por outro lado, a equação 3.5 reproduz a correlação para uma placa horizontal com a superfície quente voltada para baixo.

$$\dot{Q}_{conv} = \bar{h}A_s(T_B - T_{Amb}) \quad (3.1)$$

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu}_L k}{L} \quad (3.2)$$

$$T_{filme} = \frac{(T_s + T_{Amb})}{2} \quad (3.3)$$

$$\bar{Nu}_L = (0,825 + \frac{0,383Ra_L^{\frac{1}{6}}}{(1 + \frac{0,492}{Pr}^{\frac{9}{16}})^{\frac{8}{27}}})^2 \quad (3.4)$$

$$\bar{Nu}_L = 0,27Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (3.5)$$

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_{Amb})L^3}{\nu\alpha} \quad (3.6)$$

Utilizando estas equações foi determinado o coeficiente de transferência de calor e depois substituindo na equação 3.1, foi determinado a potência calorífica total de convecção $\dot{Q}_{conv} = 13.1$ W. Os demais dados utilizados no cálculo, assim como alguns resultados

intermediários, estão apresentados resumidamente na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Resumo da análise de convecção.

Variável	Valor
T_{filme}	120°C
β	0.0025 K^{-1}
ν_{ar}	26.41x10 ⁻⁶ m ² /kg
k_{ar}	33.8x10 ⁻³ W/mK
ρ_{ar}	0.871 kg/m ³
c_{par}	1014 J/kg.K
α_{ar}	38.3x10 ⁻⁶ m ² /s
P_r	0.690
$h_{vertical}$	8.33 W/m ² .K
$Q_{vertical}$	8.73 W
$h_{horizontal}$	4.12 W/m ² .K
$Q_{horizontal}$	4.37 W
Q_{Conv}	13.1 W

A principal função da cilindro de plastificação é fornecer energia suficiente ao sistema sob a forma de calor, de modo que o polímero extrudido esteja a uma temperatura compatível com a viscosidade desejada. O ABS é extrudido a um caudal máximo de 5 mm³/s, o que resulta num caudal mássico de 5.25x10⁻⁶ kg/s. A massa deve ser aquecida durante o percurso do material na câmara deste à temperatura ambiente até à temperatura de processamento. A forma mais simples de calcular a quantidade de calor para aquecer esta massa, está apresentada na equação 3.7, onde \dot{m} é o caudal mássico e T_{proc} a temperatura de processamento.

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{mass} c_p (T_{proc} - T_{amb}) \quad (3.7)$$

Esta fórmula despreza o efeito da variação do calor específico (c_p) com a temperatura, que pode ser alta, em especial abaixo da temperatura de transição vítrea, onde ocorre a maior variação. No entanto o c_p tende a decrescer, o que significa que a equação 3.7 preza pela segurança. Acresce ainda que os dados da variação do c_p são de difícil acesso. Outro ponto também desprezado é o ponto de fusão, onde ocorre a dissolução dos cristais e um aumento do c_p . Contudo, devido ao baixo nível de cristalinidade do ABS, este também será desprezado.

Tabela 3.12: Resumo da análise de condução.

Variável	Valor
T_{proc}	240°C
T_{Amb}	22°C
\dot{m}_{mass}	5.25x10 ⁻⁶ kg/s
cp_{ABS}	2080 J/kg.K
\dot{Q}_{Cond}	2.4 W

Após a determinação das principais fontes de calor no sistema, a potência calorífica total é dado pela equação 3.8, resultando em $\dot{Q}_{total} = 15.5$ W.

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{cond} \quad (3.8)$$

Por outro lado, também se observa uma baixa eficiência do sistema, uma vez que aproximadamente 84% da energia é desperdiçada no aquecimento do ambiente, o que seria de esperar dado que a área sujeita a trocas de calor representa também ela um maior valor. Existem soluções para aumentar a eficiência, sendo que a mais indicada na situação em causa será a utilização de uma camada isolante. Contudo, como será posteriormente analisado, os aquecedores industriais possuem potências mínimas muito superiores a esta, e o ar dentro do cilindro precisa de ser aquecido, pelo que assim, esta troca de calor por convecção pode ser vista não como uma perda, mas sim como um complemento ao aquecimento do granulado.

Calculo da Potência Necessária do Motor

Este estudo tem como objetivo calcular a potência necessária para fornecer movimento ao fuso de alimentação. Para tal recorreu-se a cálculos de cariz simplifcativo para o cálculo deste valor, aplicando depois um valor de segurança para combater qualquer imprevisto de cálculo. As considerações feitas para o dimensionamento do motor foram baseadas no estudo do processo de injeção de moldes e de projetos de cariz *open source* que produziram bons resultados. O valor do comprimento do cilindro de plastificação é dado, segundo Womer (2011) normalmente por uma razão de comprimento e diâmetro do fuso igual a 16 ($L/D = 16$). O valor escolhido para o diâmetro do fuso exterior foi de 8 mm e 2 mm de diâmetro interior e um passo igual ao diâmetro de modo a conseguir movimentar granulado de 3mm de diâmetro. Outra razão para a escolha do fuso foi a razão entre o comprimento do fuso e do diâmetro, já referida, dado que estas medidas são diretamente proporcionais. Assim foi assegurado que o extrusor não apresenta dimensões muito excessivas. Foi calculado em primeiro lugar o caudal volúmico à saída do extrusor, através da Equação 3.9, assumindo a velocidade de extrusão alvo, mencionada neste

capítulo. A equação do cálculo de caudal volúmico é dada por:

$$\dot{m}_{vol,bico} = v_{SB}A \quad (3.9)$$

Onde $\dot{m}_{vol,bico}$ é o caudal volúmico, v_{SB} é a velocidade de extrusão (velocidade à saída do bico extrusor) e A a área de secção, que gera um valor de $\dot{m}_{vol,bico} = 5 \text{ mm}^3/\text{s}$. Assumindo que existe conservação de massa, o caudal no interior do cilindro de plastificação é dado pela seguinte condição:

$$\dot{m}_{vol,cilindro} = \dot{m}_{vol,bico} \quad (3.10)$$

De onde se obtém que a velocidade no interior do cilindro ($v_{cilindro}$) é de 0.106 mm/s. Dado isto, considerando o passo do fuso, é possível calcular o número de rotações que o fuso realiza por minuto, através das equações 3.11 e 3.12,

$$t_p = \frac{p_f}{v_{cil}} \quad (3.11)$$

$$N = \frac{60}{t_p} \quad (3.12)$$

Onde t_p é o tempo necessário para dar uma rotação, p_f o passo do fuso e N o número de rotações por minuto. O valor de tempo por rotação calculado foi $t_p = 76$ segundos que substituindo na Equação 3.12 gera uma rotação $N = 0.8$ rpm.

Em seguida, procede-se ao cálculo da perda de carga (ΔP) que depois será utilizada para o cálculo da potência do motor a selecionar. Segundo a teoria de fluxo a perda de carga gerada pelo conjunto do cilindro de plastificação e o fuso para um fluido newtoniano, dado que a rotação requerida pelo projeto é muito reduzida, é dada pelas seguintes expressões 3.13 ou 3.14, enquanto que as equações 3.16, 3.17 e 3.15 são complementares ao cálculo desta.

$$\dot{m}_{mass} = \alpha N - \frac{\beta}{\mu} \Delta P \quad (3.13)$$

$$\Delta P = \frac{(-\dot{m}_{mass} + \alpha N)\mu}{\beta} \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_{mass} = \rho \dot{m}_{vol} \quad (3.15)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} W H D \cos \theta \quad (3.16)$$

$$\beta = \frac{W H^3}{12\mu} \quad (3.17)$$

Onde α e β são constantes de proporcionalidade dependentes da geometria do fuso, apresentados na Figura 3.18, D é o diâmetro exterior do fuso, H é a altura do canal e θ o ângulo da *helix* e μ é a viscosidade dinâmica à temperatura de processamento do material em estudo (ABS).

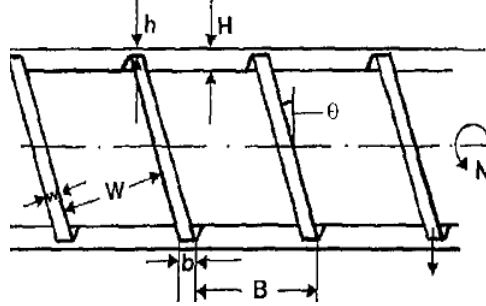


Figura 3.18: Parâmetros geométricos do fuso de alimentação.

Dado isto chegou-se a um valor de $\Delta P = -1.98 \times 10^7$ Pa.s, o que significa que o motor a selecionar deve ter que exercer uma pressão igual ou superior para combater esta perda. Para assegurar um bom funcionamento é multiplicado um fator de segurança sobre o valor da perda de carga, em módulo, de 25% para a obtenção da pressão necessária que o motor realize, sendo $P_{motor} = 2.48 \times 10^7$ Pa.s. Com isto e fazendo uma analogia com a pressão hidráulica podemos obter a potência necessária do motor (W_{mec}) a selecionar pela equação 3.18,

$$W_{mec} = \dot{m}_{mass} P_{motor} \quad (3.18)$$

onde se obteve uma potência de 128.6 W. Dado que os motores disponibilizados são muitas das vezes classificados pelo torque (T) de retenção, dá-se a conversão desta potência através da equação 3.19, onde se obteve um torque igual a 1.2 N.m. Dado isto as considerações feitas e os resultados obtidos são apresentadas na Tabela 3.13 e 3.14, respetivamente.

$$T = \frac{2\pi P}{60 N} \quad (3.19)$$

Tabela 3.13: Considerações e suposições feitas para a seleção da potência do motor.

Parâmetros	Valor
Diâmetro interno do fuso	$D_{fi} = 2 \text{ mm}$
Diâmetro do granulado	$D_{gran} = 3 \text{ mm}$
Diâmetro cilindro	$D_{cil} = 8 \text{ mm}$
Diâmetro externo do fuso	$D_{fe} = 8 \text{ mm}$
Velocidade a saída do bico	$v_{SB} = 40 \text{ mm/s}$
Diâmetro do Bico	$D_B = 0.4 \text{ mm}$
Passo do fuso	$p_f = 8 \text{ mm}$
Comprimento cilindro	$L_{cil} = 0.128 \text{ m}$
Razão entre o comprimento e diâmetro do fuso	$L/D = 16$
Viscosidade dinâmica a 240°C	$\mu = 200 \text{ Pa.s}$
Diâmetro externo do fuso	$D_{fe} = 8 \text{ mm}$
Altura do canal	$H = 3 \text{ mm}$
Ângulo da helix	$\theta = 30^\circ$

Tabela 3.14: Resultados obtidos para a seleção da potência do motor.

Parâmetro	Valor
\dot{m}_{vol}	$5 \text{ mm}^3/\text{s}$
ν_{cil}	$0,106 \text{ mm/s}$
t_p	76 s
\dot{m}_{mass}	$5,25 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$
ΔP	$-1.98 \times 10^7 \text{ Pa}$
P_{motor}	$2.48 \times 10^7 \text{ Pa.s}$
W_{mec}	$128,6 \text{ W}$
T	$1,2 \text{ N.m}$

3.8 Geração e Seleção de Conceitos

O passo seguinte é geração, seleção e teste de diferentes conceitos de solução. Segundo Limberg (2008) o conceito de produto pode ser referido como uma descrição aproximada do uso de tecnologias, princípios de trabalho e a forma física do produto a ser realizado. Através da exploração de alternativas, cedo no processo de inovação, reduz-se amplamente a probabilidade da equipa encontrar um conceito superior mais tarde nesse mesmo processo, ou que um concorrente introduza uma inovação drasticamente melhor. Primeiramente será feita a análise funcional da impressora 3D. De seguida clarificam-se as funções principais e subdividem-se as mesmas em funções mais simples. Para cada função serão procuradas soluções já existentes bem como serão pensadas soluções inovadoras. Finalmente procede-se à combinação das diferentes soluções e à sua esquematização em esboços.

3.8.1 Decomposição de Funções

Na geração de novas soluções para os diversos conjuntos e sub conjuntos de um dado produto, por norma é comum proceder-se à decomposição do problema inicial em problemas mais simples, com o objetivo de facilitar o processo de conceção. Neste contexto, procedeu-se a uma decomposição de funções do produto a desenvolver.

A Figura 3.19 representa o diagrama de funções elaborado no âmbito do presente projeto.

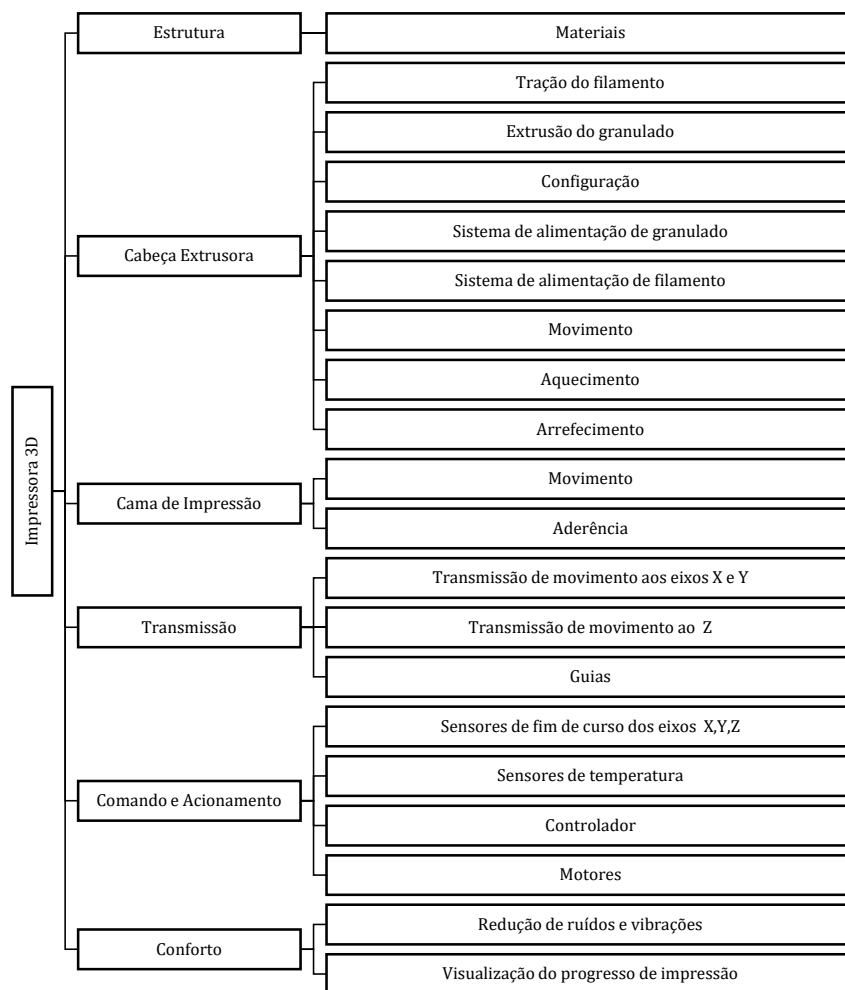


Figura 3.19: Decomposição de Funções.

3.8.2 Classificação de Conceitos

Após a decomposição das funções do produto e a clarificação dos objetivos de utilização, a próxima etapa consiste em considerar um conjunto de soluções para os vários módulos da impressora, de forma a dar resposta às funções de utilização definidas anteriormente. A Tabela 3.15 ilustra as diversas soluções consideradas.

Tabela 3.15: Classificação de Conceitos.

Função	Subfunção	Conceitos
Estrutura	Materiais	⇒ Perfil de alumínio. ⇒ Plástico. ⇒ Chapa cortada.
Cabeça Extrusora	Configuração	⇒ Sistema com um extrusor com capacidade de impressão das duas formas do material. ⇒ Sistema com dois extrusores com capacidade de impressão de cada uma das formas do material simultaneamente. ⇒ Dois sistemas de extrusão substituíveis (impressão a fio ou por granulado).
	Sistema de alimentação de granulado	⇒ Armazenamento e alimentação direto do funil. ⇒ Armazenamento separado do funil de alimentação.
	Sistema de alimentação de filamento	⇒ Direto. ⇒ Bowden. ⇒ Fixo.
	Movimento	⇒ Deslocamento em X, Y e Z. ⇒ Deslocamento em X e Y. ⇒ Deslocamento em X ou Y. ⇒ Deslocamento em Z. ⇒ Deslocamento em Z e Y ou Z e X.
	Aquecimento	⇒ Cartucho aquecedor. ⇒ Resistência com alhetas.
	Arrefecimento	⇒ Convecção natural. ⇒ Convecção forçada.
Cama de Impressão	Movimento	⇒ Fixa. ⇒ Deslocamento em X, Y e Z. ⇒ Deslocamento em X e Y. ⇒ Deslocamento em X ou Y. ⇒ Deslocamento em Z.
	Aderência	⇒ Cama quente de PCB. ⇒ Cama quente de alumínio. ⇒ Tapete aquecedor de silicone. ⇒ Cama fria.
	Tração do filamento	⇒ Extrusor Mk8 ⇒ Extrusor BQ.
	Transmissão de movimento do granulado	⇒ Sistema transmissão de movimento. por polias e correias à rosca. ⇒ Sistema de transmissão de movimento. por engrenagens à rosca. ⇒ Acoplamento direto do motor à rosca.
Transmissão	Transmissão de movimento aos eixos X e Y	⇒ Sistema de polias e correias. ⇒ Fuso trapezoidal.
	Transmissão de movimento ao Eixo Z	⇒ Varão roscado. ⇒ Fuso trapezoidal.
	Motores	⇒ Motores de passo Nema 17. ⇒ Servo motores.
	Guias	⇒ Guias lineares. ⇒ Sistema de veios e rolamentos lineares
Comando e Acionamento	Sensor de fim de curso dos eixos X,Y,Z	⇒ Mecânicos. ⇒ Óticos. ⇒ Magnéticos.
	Sensores de temperatura	⇒ Termopares. ⇒ Termístores. ⇒ RTD's.
	Controlador	⇒ Arduino Mega 2560 + Ramps 1.4. ⇒ Rambo. ⇒ Rumba.
Conforto	Redução de ruídos e vibrações	⇒ Sistema amortecedor no fundo da impressora. ⇒ Placas amortecedoras aplicáveis nos motores.
	Interface Humana	⇒ LCD 12864. ⇒ LCD 2004.

3.8.3 Seleção

Concluída a decomposição de funções e classificação de conceitos é necessário interligar os conceitos entre eles de forma a seleccionar quais as melhores opções para a impressora

3D a ser desenvolvida. Após serem apresentadas todas as possibilidades de conceitos para as funções e componentes mais relevantes para o desenvolvimento da plataforma é necessário selecionar quais os conceitos a abandonar e os que continuam obrigatoriamente no projeto. Para tal foram escolhidos os critérios de seleção que iriam, posteriormente, ajudar a selecionar quais os possíveis conceitos que seriam mais apropriados para cada uma das funções, para a realização desta seleção foi atribuída uma pontuação e foram avaliados os *rankings*.

Estrutura

No que diz respeito a materiais para a elaboração da estrutura serão analisados 3 tipos, perfil de alumínio, chapa cortada e plástico, Figura 3.20. Na seleção de materiais a utilizar para a estrutura (Tabela 3.16) pode se ver uma equiparável pontuação do perfil de alumínio e da chapa cortada. Para o projeto será considerado ambas opções visto serem os dois robustos e duráveis

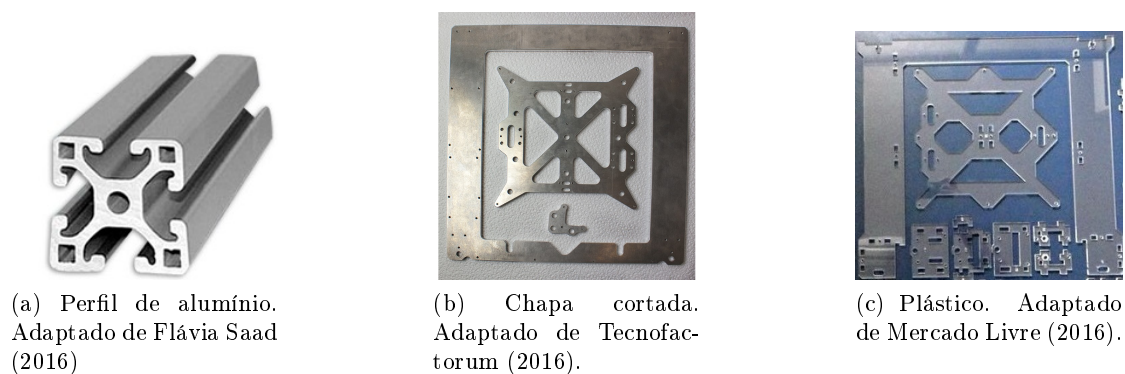


Figura 3.20: Materiais a selecionar para a estrutura.

Tabela 3.16: Matriz de seleção para o tipo de material para a estrutura.

Material			
Critério de seleção	Perfil de Alumínio	Plástico	Chapa cortada
Peso	-	+	-
Modularidade	+	-	-
Robustez	+	-	+
Durabilidade	+	-	+
Custo	0	+	0
Soma +	3	2	2
Soma -	-1	-3	-3
Pontuação	2	-1	-1
<i>Ranking</i>	1	3	2
Continua?	Sim	Não	Sim

Cabeça extrusora

No que diz respeito a configuração da cabeça extrusora foram identificados como possíveis conceitos um sistema com uma cabeça extrusora com capacidade de impressão das duas formas do material (Conceito 1), sistema com duas cabeças extrusoras sistemas com capacidade de impressão de cada uma das formas do material simultaneamente (Conceito 2) e sistema de duas cabeças extrusoras substituíveis (impressão a fio ou por granulado) (Conceito 3). Na Figura 3.21 estão representados esquematicamente esta possibilidades.

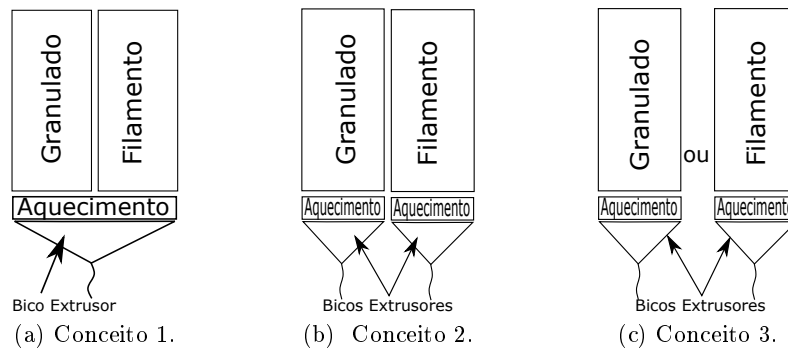


Figura 3.21: Configuração a selecionar para a cabeça extrusora.

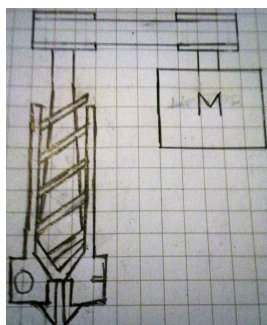
Na Tabela 3.17 foram relacionados todos estes conceitos. O conceito selecionado foi o conceito 3 pois apresenta como vantagens o menor peso, potência de aquecimento e custo em relação as outras possibilidades. Sendo assim irá desenvolver-se um sistema modular de modo a substituição de cabeça extrusora de forma simples e rápida o que possibilitará o consumidor de impressão com filamento ou granulado, indo de encontro à sua necessidade.

Tabela 3.17: Matriz de seleção para o tipo de configuração para a cabeça extrusora.

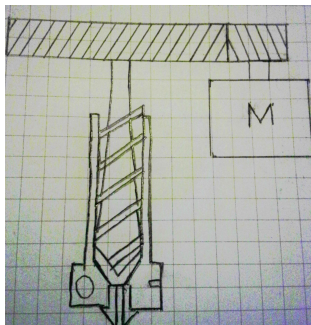
Configuração			
Critério de seleção	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3
Peso	-	-	+
Potência de aquecimento	+	-	+
Manutenção	-	-	+
Complexidade Mecânica	-	0	+
Versatilidade	+	+	-
Custo	-	-	+
Soma +	2	1	5
Soma -	-3	-4	-1
Pontuação	-1	-3	4
Ranking	2	3	1
Continua?	Não	Não	Sim

No que diz respeito a seleção do conceito para a movimentação do granulado, Tabela 3.18, conclui-se que o conceito mais adequada seria a solução de engrenagens, por ser

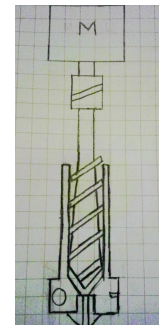
mais robusto e também por conseguir gerar mais torque. Na Figura 3.22 são ilustrados os conceitos a selecionar.



(a) Sistema transmissão de movimento por polias e correias à rosca.



(b) Sistema de transmissão de movimento por engrenagens à rosca .



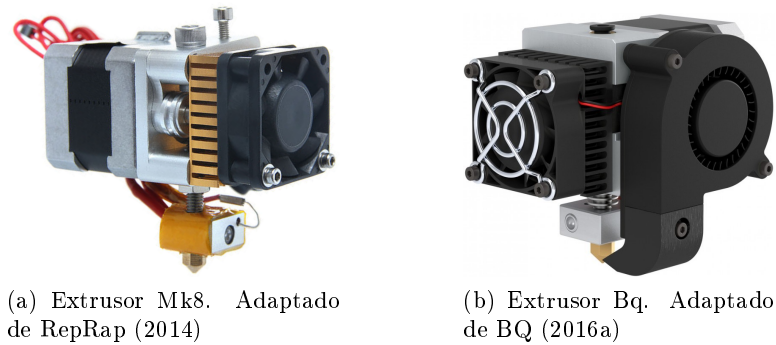
(c) Acoplamento direto do Motor à rosca.

Figura 3.22: Seleção de conceitos para a extrusão ao granulado.

Tabela 3.18: Seleção do conceito para a movimentação do granulado.

Extrusão de granulado			
Critério de seleção	Polias e correias	Engrenagens	Acoplamento direto
Torque	-	+	-
Custo	+	-	+
Robustez	-	+	-
Soma +	1	2	1
Soma -	-2	-1	-2
Pontuação	-1	1	-1
Ranking	2	1	3
Continua?	Não	Não	Sim

No que diz respeito a seleção dos elementos de tração do filamento temos o extrusor Mk8 e o extrusor BQ, Figura 3.23. Na seleção da tração do filamento (Tabela 3.19) a decisão prendeu-se principalmente no custo e versatilidade. Assim, a solução extrusor Mk8 foi a escolhida pois é encontrada de forma independente, mas o extrusor BQ está associado obrigatoriamente ao conjunto completo, por isso teria de ser fabricado, o que iria representar um custo superior a outra solução.



(a) Extrusor Mk8. Adaptado de RepRap (2014)

(b) Extrusor Bq. Adaptado de BQ (2016a)

Figura 3.23: Elementos de tração do filamento.

Tabela 3.19: Matriz de seleção da tração do filamento.

Tração do filamento		
Critério de seleção	Extrusor Mk8	Extrusor BQ
Durabilidade	+	+
Manutenção	+	+
Versatilidade	+	-
Peso	-	-
Custo	+	-
Soma +	4	2
Soma -	-1	-3
Pontuação	3	-1
Ranking	1	2
Continua?	Sim	Não

No que diz respeito ao sistema de alimentação de filamento do extrusor foram considerados como possíveis opções um sistema direto e um sistema *bowden* apresentados esquematicamente na Figura 3.24. Os dois conceitos foram relacionados na Tabela 3.20, onde se conclui que o melhor sistema é o direto pois apresenta menos manutenção, menor desperdício de material e maior versatilidade no que diz respeito a materiais.

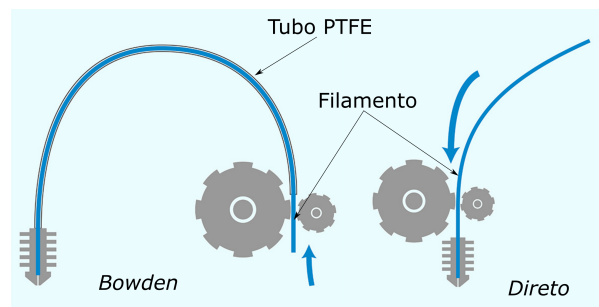


Figura 3.24: Sistemas de alimentação de filamento. Adaptado de Craft Unique (2016).

Tabela 3.20: Matriz de seleção para o tipo de sistema de alimentação de filamento.

Sistema de alimentação de filamento		
Critério de seleção	<i>Bowden</i>	Direto
Precisão	+	-
Manutenção	-	+
Versatilidade	-	+
Desperdício de Material	-	+
Soma +	1	3
Soma -	-3	-1
Pontuação	-2	2
Ranking	2	1
Continua?	Não	Sim

No que diz respeito ao sistema de alimentação de granulado foram considerados dois conceitos, armazenamento e alimentação direto do funil (Conceito 1) e armazenamento separado do funil de alimentação (Conceito 2), apresentados em esquema na Figura 3.25. Da comparação dos dois conceitos, apresentado Tabela 3.21, conclui-se que o melhor sistema é o armazenamento e alimentação direto do funil uma vez que apresenta um custo e compacticidade melhor que o outro conceito possível.

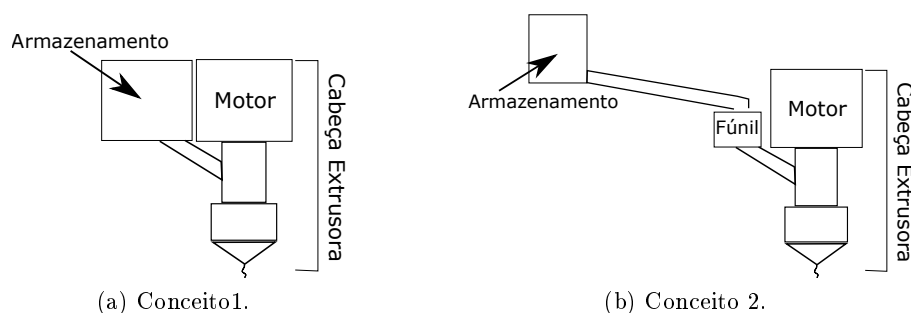


Figura 3.25: Conceitos a selecionar para sistema de alimentação de granulado.

Tabela 3.21: Matriz de seleção para o tipo de sistema de alimentação de Granulado.

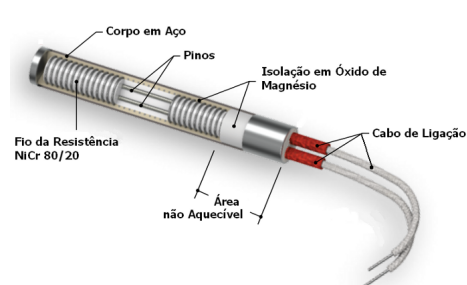
Sistema de alimentação de Granulado		
Critério de seleção	Armazenamento e alimentação direto do funil	Armazenamento separado do funil de alimentação
Compacticidade	+	-
Facilidade de implementação	-	+
Robustez	+	-
Custo	+	-
Design Apelativo	+	-
Soma +	4	1
Soma -	-1	-4
Pontuação	3	-3
Ranking	1	2
Continua?	Sim	Não

Em termos do movimento da cabeça extrusora foram considerados todos os movimentos possíveis ao longo dos eixos X,Y e Z. No entanto dado que o extrusor a desenvolver tem como objetivo a extrusão de material granulado, como nos indica a Tabela 3.22,a solução adoptada é a fixação da mesma, uma vez que evitará a movimentação do material granulado.

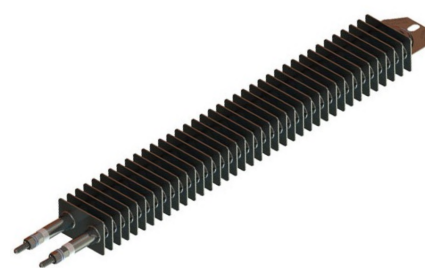
Tabela 3.22: Matriz de seleção para o movimento efetuado pela cabeça extrusora.

Critério de seleção	Movimentos					
	Fixo	X, Y e Z	X e Y	X ou Y	Z	Z e Y ou Z e X
Movimentação do granulado	+	-	-	-	-	-
Alimentação do granulado	+	-	-	-	-	-
Vibrações no extrusor	+	-	-	-	0	-
Soma +	3	0	0	0	0	0
Soma -	0	-3	-3	-3	-2	-3
Pontuação	3	-3	-3	-3	-2	-3
<i>Ranking</i>	1	3	3	3	2	3
Continua?	Sim	Não	Não	Não	Não	Não

No que diz respeito ao aquecimento do extrusor foram considerados como possíveis opções o cartucho aquecedor, e resistência com alhetas, apresentados esquematicamente na Figura 3.26. Na seleção do aquecimento do bico (Tabela 3.23) a solução escolhida é o cartucho aquecedor, que é a mais frequente no mercado, para desempenhar o aquecimento do bico, sendo que a outra solução não seria viável, uma vez que se pretendia a maior eficiência, e a construção de uma área de contacto ótima nessa solução seria bastante dispendiosa, não apresentando assim qualquer vantagem.



(a) Cartucho aquecedor. Adaptado de Printersketch 3d (2016)



(b) Resistência com alhetas. Adaptado de Loja de Resistências (2016)

Figura 3.26: Conceitos a selecionar para aquecimento do extrusor.

Tabela 3.23: Matriz de seleção do componente de aquecimento do extrusor.

Aquecimento		
Critério de seleção	Resistência com alhetas	Cartucho aquecedor
Custo	-	+
Durabilidade	0	0
Facilidade de montagem	-	+
Eficiência	-	+
Soma +	0	3
Soma -	-3	0
Pontuação	-3	3
Ranking	2	1
Continua?	Não	Sim

No que diz respeito ao arrefecimento do extrusor os conceitos utilizados foram a convecção natural ou forçada, apresentados esquematicamente na Figura 3.27. A seleção do conceito realizou-se através dos critérios ilustrados na Tabela 3.24. O conceito escolhido foi a convecção natural uma vez que se pretende a maior transferência de calor ao longo do cilindro de plastificação por forma a fundir o material.

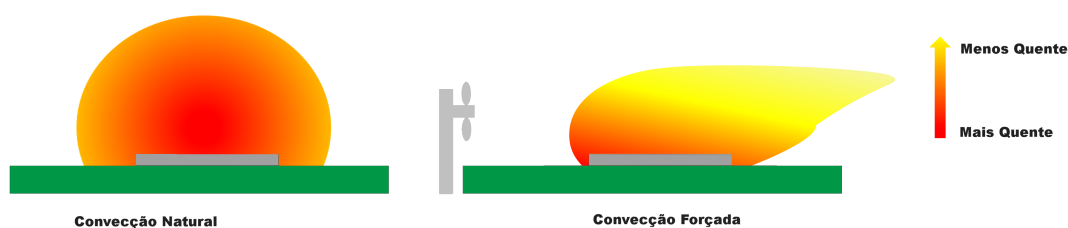


Figura 3.27: Sistemas de arrefecimento do extrusor.
Adaptado de Project2R (2015).

Tabela 3.24: Matriz de seleção do método de arrefecimento do extrusor.

Arrefecimento		
Critério de seleção	Convecção natural	Convecção forçada
Custo	+	-
Durabilidade	-	+
Peso	+	-
Eficiência	-	+
Soma +	2	2
Soma -	-2	-2
Pontuação	0	0
Ranking	1	2
Continua?	Não	Sim

Cama de impressão

No que diz respeito a movimentação da cama de impressão e dado que a escolha deste conceito depende também do movimento que o extrusor realiza, a escolha será um sistema

em que a cama realiza todos os movimentos em X,Y e Z, uma vez que, como foi referido na Secção 3.22, o extrusor está fixo.

A seleção do melhor conceito de aquecimento da cama de impressão passa por relacionar métodos de aquecimento, Tabela 3.25, assim foram considerados como opções a cama quente de PCB, cama quente de alumínio, tapete aquecedor de silicone e também a ausência de qualquer aquecimento, cama fria. Estes sistemas são ilustrados na Figura 3.28.



(a) Cama quente de PCB. Adaptado de RepRap (2016a)



(b) Cama quente de alumínio. Adaptado de RepRap (2016a)



(c) Tapete aquecedor de silicone. Adaptado de Alibaba (2016b)

Figura 3.28: Métodos de aquecimento da cama de impressão.

Tabela 3.25: Matriz de seleção do método de aquecimento da cama de impressão.

Aderência				
Critério de seleção	Cama quente de PCB	Cama quente de alumínio	Tapete aquecedor de Silicone	Cama fria
Homogeneidade de aquecimento	-	+	+	-
Aderência	+	+	+	-
Impressão de vários materiais	+	+	+	-
Temperaturas admissíveis	0	+	+	-
Manutenção	-	+	-	-
Custo	+	0	-	+
Tempo de aquecimento	0	+	+	-
Soma +	3	6	5	1
Soma -	-2	0	-2	-6
Pontuação	1	6	3	-5
Ranking	2	1	2	4
Continua?	Não	Sim	Não	Não

Transmissão

No que diz respeito a seleção dos elementos de transmissão dos eixos X e Y foram considerados fuso trapezoidal e polias e correias, ilustrados na Figura 3.29. Através da Tabela 3.26 conclui-se que a solução mais coerente é a polia e correia, uma vez que apresenta capacidade para maiores velocidades e também por ser é uma solução mais usual nas impressoras tridimensionais.

No que diz respeito a seleção dos elementos de transmissão do eixo Z foram considerados fuso trapezoidal e varão roscado, ilustrados na Figura 3.29. Na Tabela 3.27 pode-se

verificar que a solução mais adequada pois apesar de apresentar maior precisão também confere uma melhor robustez ao sistema.



(a) Polias e coreias. Adaptado de Tec3D (2016)



(b) Fuso trapezoidal. Adaptado de Alibaba (2016a)



(c) Varão roscado. Adaptado de Barão e Costa (2016)

Figura 3.29: Seleção dos elementos de transmissão do eixo Z.

Tabela 3.26: Matriz de seleção do método de transmissão de movimento aos eixos X e Y.

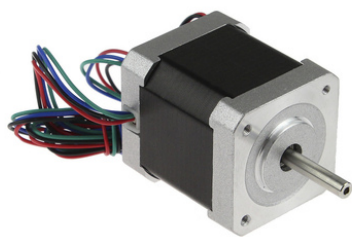
Transmissão de movimento aos eixos X e Y		
Critério de seleção	Polias e correias	Fuso trapezoidal
Precisão	-	+
Velocidade	+	-
Custo	+	-
Peso	+	-
Soma +	3	1
Soma -	-1	-3
Pontuação	2	-2
Ranking	1	2
Continua?	Sim	Não

Tabela 3.27: Matriz de seleção do método de transmissão de movimento ao eixo Z.

Transmissão de movimento ao eixo Z		
Critério de seleção	Varão roscado	Fuso trapezoidal
Precisão	-	+
Velocidades admissíveis	-	+
Custo	+	-
Peso	+	-
Robustez	-	+
Soma +	2	3
Soma -	-3	-2
Pontuação	-1	1
Ranking	2	1
Continua?	Não	Sim

No que diz respeito ao tipo de motor a utilizar apresentam-se como possibilidades os motores de passo e os servo motores, ilustrado na Figura 3.30. Na seleção do tipo de motor (Tabela 3.30) a decisão prendeu-se principalmente no custo e facilidade de

programação, portanto a opção mais favorável é o motor de passo, o mais habitual em impressoras 3D.



(a) Motor de passo Nema 17. Adaptado de Inventables (2016)



(b) Servo motor. Adaptado de Soluções Industriais (2016)

Figura 3.30: Motores a seleccionar.

Tabela 3.28: Matriz de seleção dos motores.

Motores		
Critério de seleção	Motores de passo	Servo motores
Durabilidade	+	+
Facilidade de programação	+	-
Peso	-	+
Custo	+	-
Soma +	3	2
Soma -	-1	-2
Pontuação	2	0
<i>Ranking</i>	1	2
Continua?	Sim	Não

No que diz respeito ao tipo de guias a utilizar apresentam-se como possibilidades guias lineares e um sistema de varões lisos e rolamentos, ilustrado na Figura 3.31. Na seleção, Tabela 3.31, a decisão prendeu-se principalmente no custo e peso, portanto a opção mais favorável é o sistema de varões lisos e rolamentos. No entanto as guias lineares poderão ser uma melhor solução para a movimentação da mesa na direção Z, dada a sua robustez.



(a) Guias lineares. Adaptado de Rolon (2016)



(b) Sistema de varões lisos e rolamentos lineares. Adaptado de 3dxtusionlab (2016)

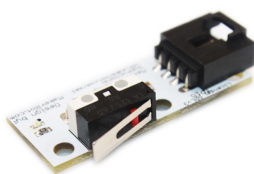
Figura 3.31: Elementos a seleccionar para as guias.

Tabela 3.29: Matriz de seleção das guias.

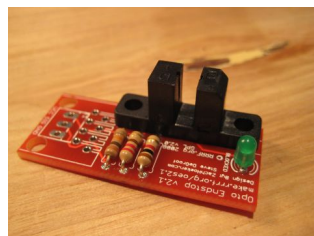
Guias		
Critério de seleção	Guias lineares	Varões lisos e Rolamentos lineares
Durabilidade	+	+
Precisão	+	-
Peso	-	+
Custo	-	+
Soma +	2	3
Soma -	-2	-1
Pontuação	0	2
Ranking	2	1
Continua?	Sim	Sim

Acionamento e comando

Na seleção dos fins de curso (Tabela 3.30) o sensor de contacto é o mais apropriado, uma vez que apresentou na maioria uma pontuação superior as soluções concorrentes, e em relação à precisão dos conceitos, este critério de seleção não é determinante porque não irá representar risco durante a impressão. Na Figura 3.32 estão apresentados os sensores em análise.



(a) Mecânicos. Adaptado de Google (2016)



(b) Ópticos . Adaptado de Google (2016)



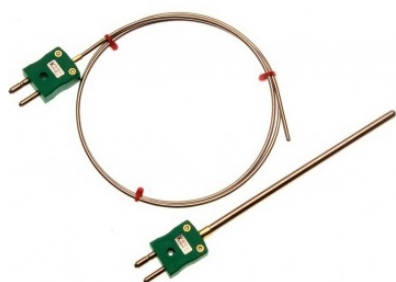
(c) Magnéticos. Adaptado de Google (2016)

Figura 3.32: Sensor de fim de curso a seleccionar.

Tabela 3.30: Matriz de seleção dos sensores de fim de curso.

Sensores de fim de curso dos eixos X,Y,Z			
Critério de seleção	Mecânicos	Óticos	Magnéticos
Peso	+	-	-
Facilidade de aplicação	+	-	-
Precisão	-	+	+
Custo	+	-	-
Soma +	3	1	1
Soma -	-1	-3	-3
Pontuação	2	-2	-2
Ranking	1	3	2
Continua?	Sim	Não	Não

Na seleção dos sensores de temperatura (Tabela 3.31) o termistor é o mais apropriado, uma vez que apresenta um tempo de resposta rápida, uma maior sensibilidade que os concorrentes e por ser a solução mais corrente no mercado de impressão 3D. Na Figura 3.33 estão apresentados os sensores em análise.



(a) Termopares. Adaptado de Hampton Controls (2016)



(b) RTD's . Adaptado de Smart Sensors (2016)



(c) Termistores. Adaptado de Wikipedia (2016)

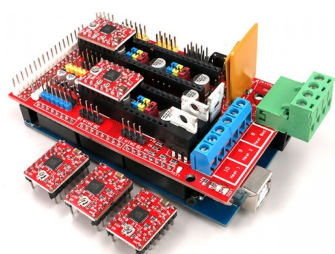
Figura 3.33: Sensor temperatura a seleccionar.

Tabela 3.31: Matriz de seleção dos sensores de temperatura.

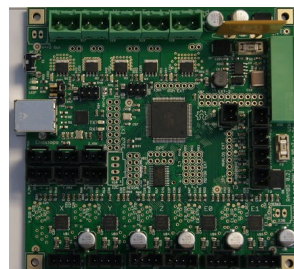
Sensores de temperatura			
Critério de seleção	Termopares	RTD's	Termistores
Custo	+	-	+
Sensibilidade	-	+	+
Linearidade	+	+	-
Precisão	-	+	+
Tempo de resposta	+	-	+
Soma +	3	3	4
Soma -	-2	-2	-1
Pontuação	1	1	3
Ranking	2	3	1
Continua?	Não	Não	Sim

Na seleção do controlador, ilustrada na Tabela 3.32, o critério com maior peso foi o custo, uma vez que o custo a cada solução apresenta uma grande dispersão. Além

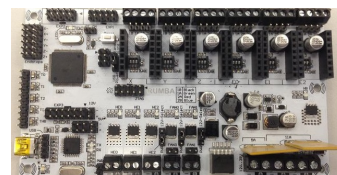
da solução Arduino Mega 2560 mais Ramps 1.4 ser a mais económica é também a que apresenta maior durabilidade ou até um custo de reparação inferior, uma vez que é constituída por módulos. Na Figura 3.34 estão apresentados os sensores em análise.



(a) Arduino Mega 2560 + Ramps 1.. Adaptado de 3dmarker (2016)



(b) Rambo . Adaptado de RepRap (2015)



(c) Rumba. Adaptado de RepRap (2016d)

Figura 3.34: Controladores a seleccionar.

Tabela 3.32: Matriz de seleção do controlador.

Controlador			
Critério de seleção	Arduino Mega 2560 + Ramps 1.4	Rambo	Rumba
Custo	+	-	-
Facilidade de programação	+	0	0
Durabilidade	+	+	+
Modularidade	+	-	-
Soma +	4	1	1
Soma -	0	-2	-2
Pontuação	4	-1	-1
<i>Ranking</i>	1	3	2
Continua?	Sim	Não	Não

Conforto

Na seleção dos elementos de redução de ruídos e vibrações, ilustrada na Tabela 3.33, o mais adequado, tendo em conta o critério de eficiência é a placa amortecedora, no entanto optou-se pela combinação dos dois uma vez que o custo associado não é muito e leva a uma melhor redução dos efeitos indesejáveis. Na Figura 3.35 estão apresentados os conceitos mencionados.



(a) Amortecedor no fundo da impressora. Adaptado de Alibaba (2016c)



(b) Placas amortecedoras aplicáveis nos motores. Adaptado de Llamatech (2016)

Figura 3.35: Elementos a selecionar para redução de ruídos e vibrações

Tabela 3.33: Matriz de seleção do sistema de redução de ruídos e vibrações.

Redução de ruídos e vibrações		
Critério de seleção	Amortecedor no fundo da impressora	Placas amortecedoras
Eficiência	-	+
Peso	+	+
Aplicabilidade	+	+
Custo	+	-
Soma +	3	3
Soma -	-1	-1
Pontuação	2	2
Ranking	2	1
Continua?	Sim	Sim

Na seleção da interface humana, Tabela 3.34, pretende-se que o consumidor tenha a possibilidade de obter o máximo de informações da impressão e por isso escolheu-se o LCD 12684. De notar que ambos os conceitos já vêm equipados com entrada de cartão SD, o que possibilita a impressão sem a conexão ao um computador. Os conceitos são ilustrados na Figura 3.36.



(a) LCD 12684. Adaptado de Dhgate (2016)



(b) LCD 2004. Adaptado de RepRap (2016c)

Figura 3.36: Elementos a selecionar para interface humana.

Tabela 3.34: Matriz de seleção de interface humana.

Interface Humana		
Critério de seleção	LCD 12864	LCD 2004
Facilidade de utilização	+	-
Facilidade de programação	+	+
Quantidade de informação visualizável	+	-
Custo	-	+
Soma +	3	2
Soma -	-1	-2
Pontuação	2	0
<i>Ranking</i>	1	2
Continua?	Sim	Não

Capítulo 4

Projeto Mecânico e Térmico

4.1 Modelação

Este capítulo aborda toda a componente de modelação associada à conceção da impressora 3D. Para a modelação da mesma foi considerado todo o processo de desenvolvimento do produto em conjunto com o dimensionamento analítico da mesma. Com objetivo de desenvolver uma impressora funcional, e de forma a tentar respeitar um dos objetivos desta dissertação, a elaboração de uma impressora 3D por alimentação de granulado de baixo custo, a modelação da mesma foi desenvolvida com o máximo de elementos comerciais de modo a economizar, tanto quanto possível, custos de produção de novos elementos e de mão da obra, tentando sempre cumprir o máximo de requisitos e especificações técnicas previamente estabelecidas. Procedeu-se numa primeira fase à modelação da cabeça de extrusão, modelada num único módulo, de modo a que a alteração entre este conjunto e o conjunto de extrusão de filamento seja o mais fácil e rápido. De seguida, procedeu-se à modelação da estrutura da impressora e de todos os seus acessórios, tendo sempre em conta os resultados do QFD elaborado anteriormente. Para a modelação de todos os componentes da impressora recorreu-se ao software CATIA® V5R19 (Dassault Systèmes, Vélizy- Villacoublay France).

4.1.1 Cabeça Extrusora

O projeto de desenvolvimento da cabeça de extrusão, teve como objetivo a criação de um sistema alimentado por material granular de baixo custo. De modo a atingir o fim desejado, modelou-se todos os componentes do mesmo, sendo alguns específicos para o efeito, e outros modificados possibilitando a compatibilização com o máximo de peças existentes no mercado.

Uma vez que se optou por uma extrusão por granulado, foi necessário desenvolver alguns componentes principais tais como o cilindro de plastificação e o bloco de aquecimento assim como alguns suportes.

O motor escolhido teve em conta os valores calculados neste projeto, assim foi escolhido um motor com redutor com uma redução de 5:1 que possibilita a rotação exigida no projeto assim com as necessidades de torque. Este motor tem capacidade de gerar um torque de 2.6 Nm à saída do redutor, o que supera os 1.2 Nm calculados anteriormente. No entanto optou-se por esta solução por ser mais barata do que a fabricação de um redutor próprio para o sistema, e ainda por ser mais fácil de montagem. Este redutor também permitira o funcionamento à velocidade calculada de 0.8 rpm.

O motor está acoplado ao fuso de alimentação, que está inserido no cilindro de plastificação, por um acoplador rígido, fazendo este fuso movimentar-se e consequentemente possibilitar o arrasto do granulado ao longo do cilindro de plastificação ate ao bloco de aquecimento e consequente extrusão pelo bico.

Segundo já foi mencionado previamente o comprimento do cilindro de plastificação é dado pela razão $L/D=16$, o que para um diâmetro de fuso de 8mm, utilizado neste projeto, levou a obtenção de um comprimento de 128mm, porém para este projeto foi considerado esse comprimento como a distância entre a saída do material, bico, e a entrada de material granulado. Esta consideração foi imposta pois este sistema engloba um caudal de material e dimensões muito mais reduzidas que um sistema de extrusão de plástico convencional, permitindo assim a redução do comprimento do extrusor. O acoplamento do cilindro de plastificação e do bloco de aquecimento fez-se através de uma rosca (M12) localizada no final do mesmo.

No que diz respeito ao bloco de aquecimento optou-se por uma abordagem menos habitual. Este foi desenvolvido de modo a que o cartucho fica-se na vertical para que se possibilite uma maior transferência de calor longitudinal ao longo cilindro de plastificação. Neste, são acoplados o cilindro de plastificação e o bico extrusor de 0.4mm.

Para armazenamento de material foi desenvolvido um funil de modo a ter uma capacidade de aproximadamente 500g de material granulado, proposto na matriz QFD, e as suas dimensões tiveram em conta tanto o tamanho e posição de todos os outros elementos da cabeça extrusora. Este funil está fixo por dois parafusos M3 a um bloco de alumínio de suporte. Neste bloco também é fixado uma peça em chapa cortada e quinada que serve para suporte do motor e onde esta também acoplado um rolamento para possibilitar a rotação do fuso de alimentação. Este conjunto está fixado a um suporte em chapa para possibilitar a montagem como um módulo à estrutura da impressora.

Dado o comprimento do extrusor foi desenhado outro suporte que irá ser utilizado para o acoplamento do sistema de filamento e para estabilização do do extrusor do sistema de impressão por granulado.

Na Figura 4.1 está ilustrada a modelação da cabeça de extrusão da impressora, bem como todos os diferentes componentes da mesma.

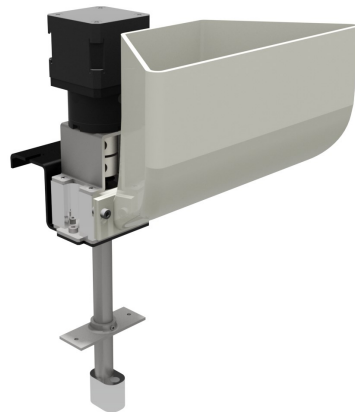


Figura 4.1: Cabeça de extrusão.

Na figura 4.2 está ilustrado um desenho do conjunto simplificado em corte no plano central e onde os principais elementos da cabeça de extrusão estão identificados.

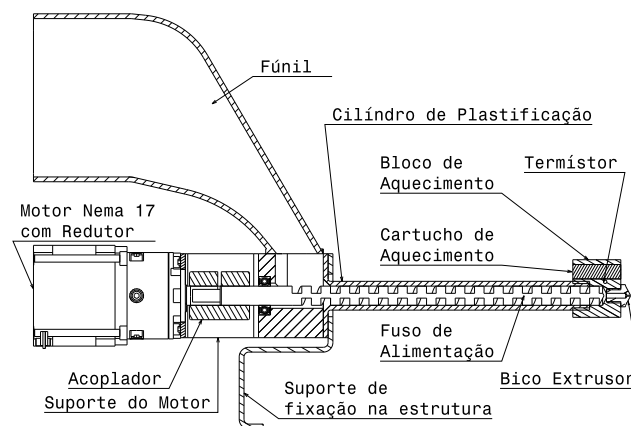


Figura 4.2: Modelo da cabeça de extrusão, sem escala.

4.1.2 Estrutura da Impressora

Relativamente ao processo de conceção e modelação da impressora, foi dada especialmente atenção ao custo dos componentes comerciais, de maneira a que a estrutura fosse concebida, tanto quanto possível, por estas bem como todos os requisitos identificados como fundamentais de acordo com os requisitos do cliente. Assim, recorreu-se a soluções atualmente existentes no mercado ou de acesso livre (*open-source*) que pudessem ser integradas na conceção e modelação da estrutura da impressora. Desta forma, foi possível adaptar a solução final, com base em algumas soluções já testadas e existentes no mercado, de modo a que a estrutura da impressora, também ela, seja económica. Na Figura 4.3 é apresentado o resultado final da impressora modelada na sua totalidade. No entanto, a modulação foi efetuada em subconjuntos/módulos que foram modelados individualmente e, posteriormente, foi feita a montagem de todos os elementos de modo

a obter uma solução funcional, tentando assim responder a todos os princípios definidos no processo de desenvolvimento de produto (QFD) definidos anteriormente.



Figura 4.3: Impressora desenvolvida.

Um dos subconjuntos modelados foi a estrutura de suporte da impressora, esta foi desenvolvida essencialmente com chapa metálica cortada e quinada (ver Figura 4.4). Por outro lado, para o suporte da cabeça de extrusão foram escolhidos perfis de alumínio. A escolha do material revelou-se bastante satisfatória em relação ao peso próprio do mesmo, não obstante a algumas preocupações relativas à sua resistência mecânica, razão pela qual foi necessário incluir uma análise computacional mecânica da estrutura da impressora, recorrendo ao método de elementos finitos. Esta análise estrutural será discutida em detalhe mais adiante neste capítulo.

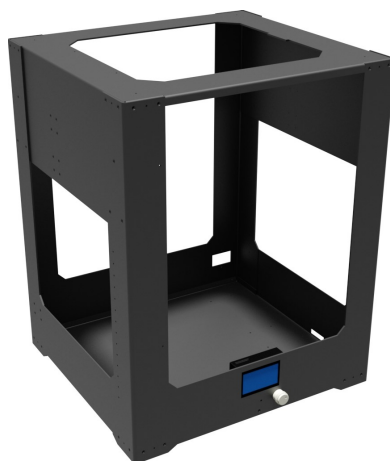


Figura 4.4: Estrutura da impressora.

Relativamente ao subconjunto/módulo associado à mesa do trabalho e respetivo acionamento dos eixos X,Y e Z, foram combinadas as soluções mencionadas anteriormente

de modo a transmitirem movimento à mesa em todas as direções. Para o movimento, tanto em X como em Y, foram utilizados veios e rolamentos lineares, sendo necessário criar algumas peças para o acoplamento dos mesmos e tendo em conta que o movimento é transmitido por uma correia, conforme escolhido no processo do QFD. Enquanto na direção Z, associada à subida e descida da mesa, utilizou-se dois fusos, sendo que o guiamento foi realizado com duas guias lineares. Em relação à mesa de trabalho, foi adicionada uma cama quente possibilitando a utilização de uma gama mais abrangente de materiais, como acima descrito (ver Figura 4.5).



Figura 4.5: Módulo da mesa de suporte e respetivo acionamentos.

Quanto ao subconjunto de acionamento e comando, este é constituído pela fonte de alimentação, controlador, interruptor "on/off" e ecrã LCD, sendo que todos estes elementos se encontram na parte inferior da impressora, ver Figura 4.6.

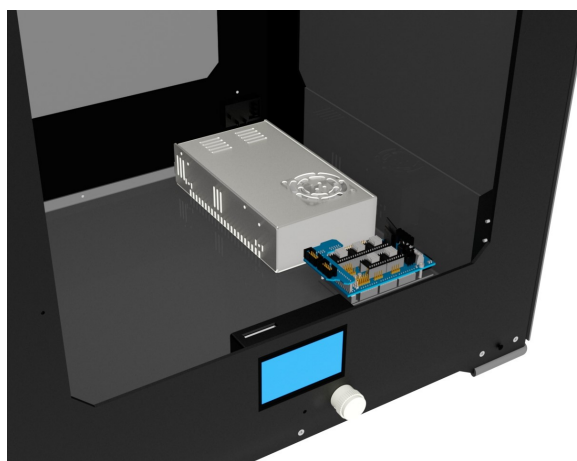
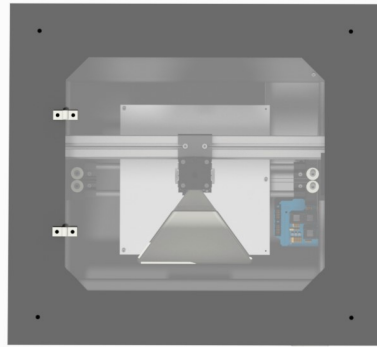


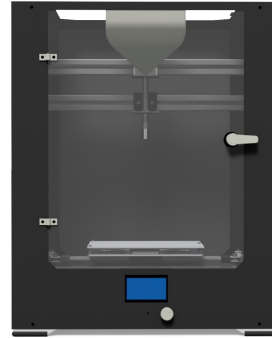
Figura 4.6: Localização da Fonte, controlador e LCD.

Finalmente, o subconjunto/módulo de proteção, foi concebido de maneira a isolar a impressora e proteger todos os componentes do meio exterior. Deste modo, colocaram-se placas de acrílico no exterior da impressora para ir de encontro com os requisitos de

baixo peso e custo referido anteriormente. Foram também colocadas portas em acrílico transparente de acesso ao funil e a área de impressão (ver Figura 4.7).



(a) Porta de acesso ao funil.



(b) Porta de acesso a área de impressão.

Figura 4.7: Vistas da modelação da impressora 3D com os acrílicos.

4.2 Análise Estrutural

Com recurso ao software de modelação e análise estrutural Inventor 2017 da Autodesk, realizou-se uma análise estrutural recorrendo ao método dos elementos finitos, a fim de avaliar a solução estrutural da impressora, assim como o efeito da integração de uma cabeça de extrusão de maior dimensão e peso. A partir desta análise foi possível identificar as zonas de maior solicitação mecânica na estrutura bem como o nível de rigidez da mesma. Adicionalmente, foram determinados os níveis de tensão e deslocamentos nos diferentes componentes estruturais, com vista a avaliar o risco de integridade e rigidez da estrutura.

4.2.1 Materiais e Métodos

No estudo numérico preconizado neste trabalho realizaram-se quatro análises estruturais. Nas três primeiras análises foram analisados os efeitos das forças de inércia gerada pela mesa de impressão na estrutura da impressora quando esta é sujeita a uma aceleração máxima nas direções dos eixos X e Y, bem como quando a aceleração máxima é aplicada simultaneamente a ambos os eixos X e Y. Outra análise realizada para avaliação da rigidez torsional da impressora, onde foi aplicado um momento torsor na face superior desta, assumindo que os seus pontos de fixação permaneciam imóveis.

A estrutura da impressora foi simplificada excluindo todas as componentes que não suportavam esforços estruturais, a fim de simplificar a análise linear elástica por o método de elementos finitos. Para a realização destas análises foi utilizado o software de elementos finitos referido no subcapítulo anterior. As propriedades mecânicas dos materiais

dos diferentes componentes foram consideradas isotrópicas e linear elásticas, atribuídas diretamente através da biblioteca de materiais do software de simulação. Os materiais utilizados foram alumínio 6061, com módulo de elasticidade de 69 GPa, coeficiente de Poisson igual 0.33 e módulo de corte de 369 GPa, para os perfis de alumínio que suportam o extrusor, e Aço, com módulo de elasticidade de 210 GPa, coeficiente de Poisson igual 0.3 e módulo de corte de 740 GPa, para os restantes componentes. Esta seleção deve-se ao facto que a movimentação da mesa nos três eixos requer uma maior robustez.

A malha gerada foi igual para todas as simulações executadas, sendo esta uma malha tridimensional com elementos tetraédricos de 4 nós. Na Tabela 4.1 encontra-se a informação em detalhe sobre a malha gerada. Na Figura 4.8 está ilustrado o modelo com a malha aplicada.

Tabela 4.1: Caracterização da malha de elementos finitos.

Características	Valor
Nº de nós	503694
Nº de elementos	287037
Tamanho médio dos elementos	0.6 mm
Tamanho mínimo dos elementos	0.3 mm
Máximo da razão de aspeto	60

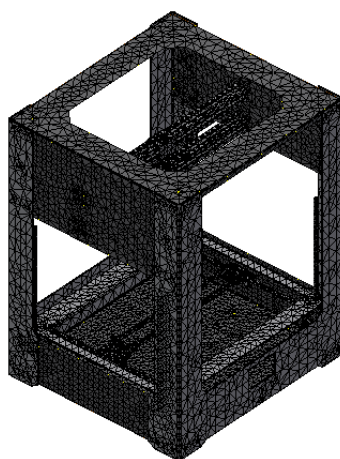


Figura 4.8: Ilustração da malha gerada.

As condições de fronteira aplicadas aos modelos numéricos foram diferentes em função das diferentes análises realizadas. Assim, por forma a resumir os diferentes casos de carga analisados, e as respetivas condições de fronteira aplicadas a cada análise, elaborou-se a Tabela 4.2. Na tabela 4.3, cada análise foi numerada e as condições fronteira aplicadas estão associadas à sua designação e magnitude, assim como a sua representação na Figura 4.9.

Tabela 4.2: Resumo das análises numéricas realizadas

Nº da análise	Tipo da análise	Caso de carga analisado	Condições fronteira aplicadas
1	Estrutural estático	Movimento de aceleração máxima da mesa de impressão na direção X	Fix+FAcx+Fz1+Fz2+Fz3+FM1+FM2+FAcz
2	Estrutural estático	Movimento de aceleração máxima da mesa de impressão na direção Y	Fix+FAcy+Fz1+Fz2+Fz3+FM1+FM2+FAcz
3	Estrutural estático	Movimento de aceleração máxima da mesa de impressão na direção XY	Fix+FAcxy+Fz1+Fz2+Fz3+FM1+FM2+FAcz
4	Estrutural estático	Momento de torção aplicado a face superior da impressora	Fix+M1

Tabela 4.3: Cargas aplicadas no modelo para simulação estrutural.

Designação	Tipo / Descrição	Magnitude	Figura
Fix	Fixação dos pés da impressora	-	-
FAcx	Força da aceleração máxima na zona de fixação na mesa de impressão na direção X.	3.9 N	4.9a
FAcy	Força da aceleração máxima na zona de fixação na mesa de impressão na direção Y.	3.9 N	4.9b
FAcxy	Força da aceleração máxima na zona de fixação na mesa de impressão na direção XY	5.5 N	4.9c
FAcz	Força de inércia da mesa de impressão na direção Z.	4.3 N	4.9d
Fz1	Peso do conjunto do motor mais a cabeça de extrusão aplicado no suporte superior	8.9 N	4.9f
Fz2	Peso do conjunto do motor mais a cabeça de extrusão aplicado no suporte inferior	3.8 N	4.9g
Fz3	Peso do conjunto da mesa de impressão	14.7 N	4.9h
FM1	Peso na zona de fixação do motor do eixo Y	3.0 N	4.9e
FM2	Peso na zona de fixação do motor do eixo X	3.0 N	4.9e
M1	Torção superior	1 N.m	4.9i

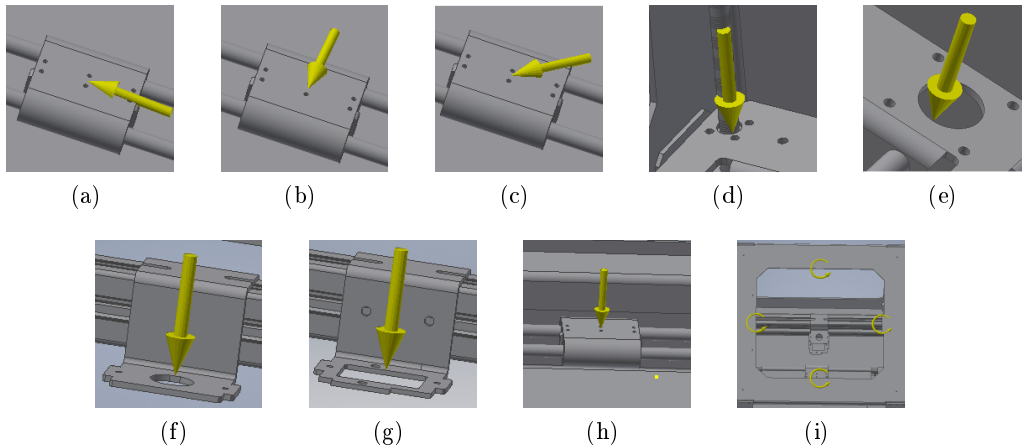


Figura 4.9: Cargas aplicadas para a elaboração da simulação.

A magnitude das forças aplicadas nas diferentes condições fronteira foram calculadas em função dos elementos que estão associados a geração de forças de inércia ou gravitacional (peso) como é o caso das forças de inércia e peso associadas à cabeça de de extrusão, motores e mesa de impressão. As forças aplicadas na zona de fixação da mesa de impressão nas direções do eixo X (FAcx) e Y (FAcy) da impressora, foram calculadas com base na aceleração angular máxima do motor de 3394 rad/s^2 , do raio da engrenagem que transmite o movimento linear ao carro pela correia e da massa da cabeça de

extrusão , este cálculo resultou numa 3.9 N de força (Reis, 2016). A força aplicada na zona de fixação da cabeça de extrusão numa direção a 45° com o eixo X ou Y (F_{Acxy}), representativa do movimento simultâneo dos 2 eixos em aceleração máxima foi de 5.5 N. O peso da cabeça de extrusão (F₂), assim como os pesos dos motores fixos nos eixos móveis X (F₄) e Y (F₅) foram aplicadas nas zonas onde estes elementos são fixos à estrutura. Também foi colocada a força produzida pela aceleração máxima do motor do eixo Z (F_{Acz}), resultando numa força de 4.3 N. O momento (M₁) foi aplicado na face superior da estrutura para simular a torção a que esta poderia ser submetida aquando da sua manipulação da impressora. A condição de contacto utilizada entre os diferentes componentes foi essencialmente modelada como uma ligação aparafusada (disponível no software), por forma a se aproximar do modelo próximo do real. Além da ligação aparafusada, também se consideraram ligações rígidas para outras condições de interface, por forma a simplificar o modelo.

4.2.2 Resultados e discussão

Na Figura 4.10, 4.11 e 4.12 são apresentados os gradientes de tensão e campos de deslocamento para as análises associadas às forças de inércia geradas pela movimentação da cabeça de extrusão nas diferentes direções, ou seja, as análises número 1, 2 e 3 respetivamente.

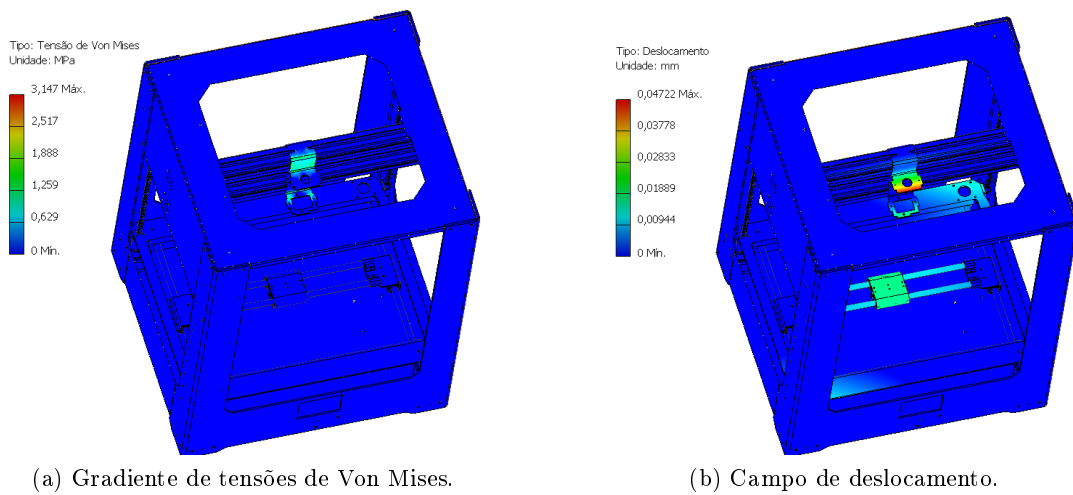


Figura 4.10: Análise 1.

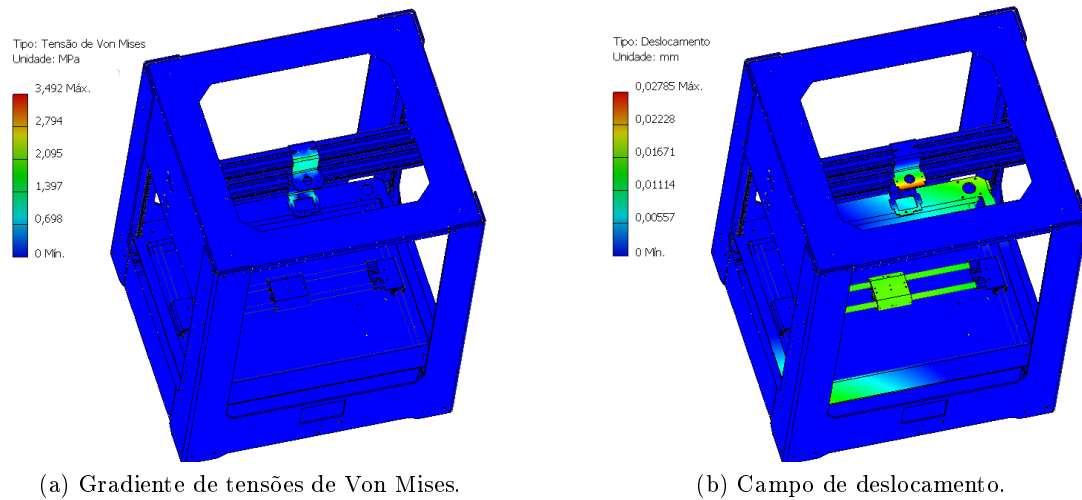


Figura 4.11: Análise 2.

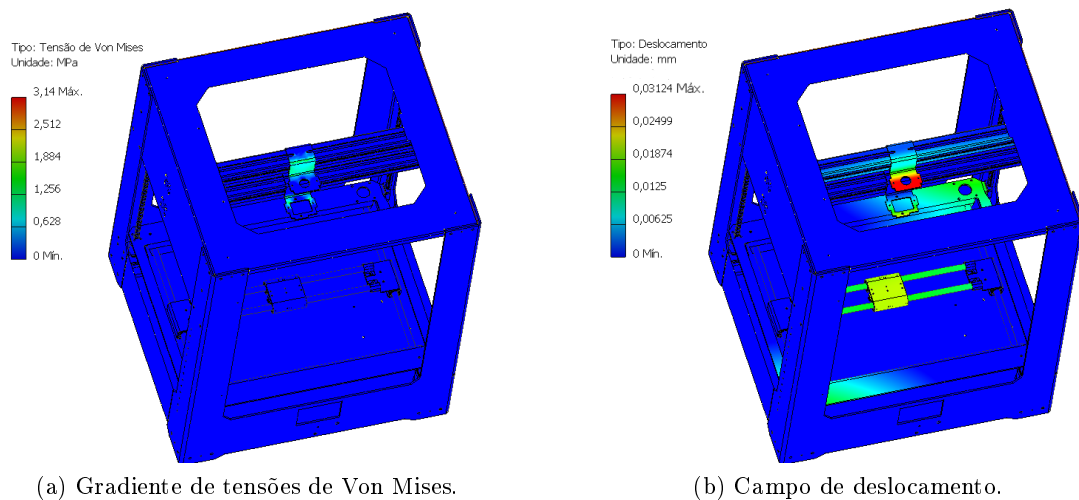


Figura 4.12: Análise 3.

Na análise número 1 obteve-se uma tensão de Von Mises máxima de 3.14 MPa, podendo-se concluir que não existe possibilidade de deformação permanente da estrutura uma vez que a tensão de cedência (Limite elástico) é muito superior. O deslocamento máximo para esta análise, foi de 0.047 mm, que poderá causar alguma perda de precisão. Na análise número 2 atingiu-se uma tensão de Von Mises máxima de 3.49 MPa mas comparando com a tensão de cedência (Limite elástico) do material esta continua a ser inferior tal como na simulação anterior. Em relação ao deslocamento máximo identificado de 0.0278 mm, tal como no caso anterior, este nível de deslocamento poderá causar problemas na precisão dimensional das peças a produzir pela impressora. Na análise número 3 a tensão máxima de Von Mises causada pelo conjunto das forças obteve-se um

valor aproximado relativamente às análises anteriores com uma magnitude de 3.1MPa e obteve um deslocamento superior aos anteriores de 0.0314.

Os resultados em termos de deslocamentos da aplicação do momento torsor à estrutura (análise 4) estão apresentados na Figura 4.13.

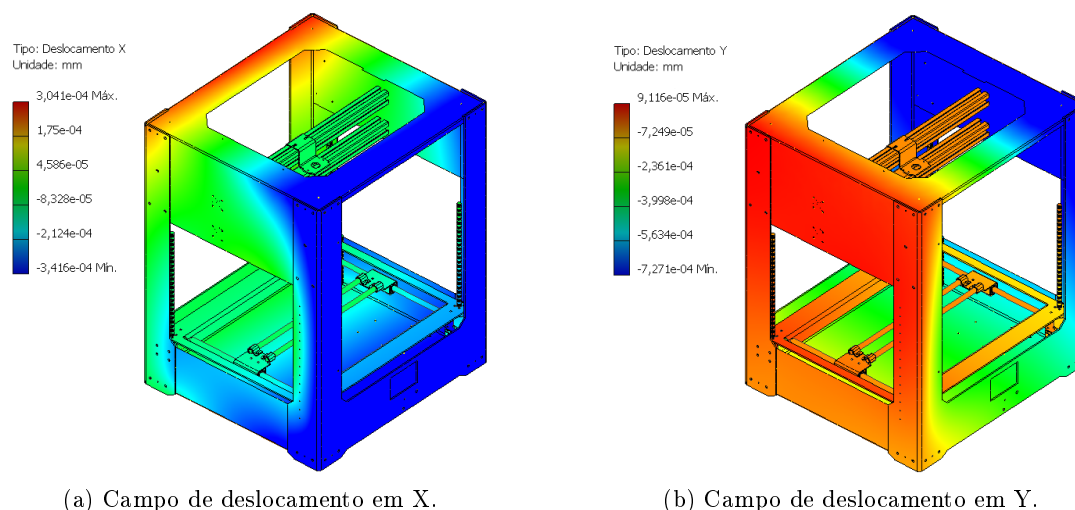


Figura 4.13: Análise 4.

Na análise número 4, analisou-se o efeito do momento torsor aplicado à estrutura, onde se calculou a distorção angular da estrutura entre a face superior e os pés de apoio. O ângulo de distorção foi de 0.0013° e o deslocamento máximo de 0.0007 mm, o que não se traduz num problema para a integridade da impressora.

Em resumo pode-se concluir que do ponto de vista estrutural foram identificados algumas preocupações que colocam em causa a integridade da estrutura da impressora ou impeça o seu correto funcionamento. Os valores máximos obtidos foram sempre na ordem dos 0.03mm, o que de facto poderá provocar a redução da precisão conseguida pela natureza do processo FDM, que envolve os desvios associados a contrações térmicas do material. Estes valores são observados nos veios de deslocação da cama de impressão assim como no suporte da cabeça extrusora (onde se encontra o valor máximo de deslocação). Isto deve-se a uma má escolha feita na seleção de conceitos, a seleção dos movimentos realizados pela cama de extrusão. Esta escolha foi feita de modo a que a cabeça de extrusão fica-se fixada, não havendo movimentação do granulado. Esta escolha não contabilizou a inercia de movimento da cama de impressão assim como a movimentação do peso da mesma. Uma solução para este problema passaria por aumentar o diâmetro dos veios ou o uso de guias lineares. No entanto estas soluções levariam a que a inercia de movimento aumenta-se. Uma solução mais viável seria a mesa de impressão so realizar o movimento no eixo Z e por consequente a cabeça extrusora realizar movimentos nos eixos X,Y, dado que a movimentação do granulado talvez não seria tão prejudicial

para a qualidade de impressão quanto a escolha projetada.

4.3 Análise Térmica

Dada a importância da cabeça de impressão para este trabalho, achou-se pertinente elaborar uma análise térmica, pois o processo de extrusão está diretamente associado à transferência de calor. Sendo assim realizou-se um estudo numérico por forma a analisar a distribuição e evolução das temperaturas na cabeça de extrusão durante a sua operação. Pretendeu-se, nomeadamente, avaliar se as temperaturas desenvolvidas na fase estacionária de aquecimento e depois na fase transitória de impressão podem de algum modo comprometer o correto funcionamento do dispositivo. Esta fase consistiu na criação de um modelo virtual recorrendo ao software CFD 2016 da Autodesk, no qual foi criado um modelo de simulação numérica onde foram implementados os parâmetros de funcionamento do equipamento estabelecidos. A criação deste modelo virtual visa traduzir as características de operação do equipamento referentes ao processo de aquecimento do mesmo.

4.3.1 Simulação Térmica

Para a realização desta análise, tal como referido anteriormente, foi utilizado o software CFD 2016 da Autodesk. Este software permite a realização de análises térmicas em regime estacionário e em regime transiente. Com a análise em regime estacionário pretende-se analisar a distribuição das temperaturas na cabeça de extrusão e identificar eventuais regiões problemáticas, elevadas ou baixas temperaturas que possam colocar em causa o correto funcionamento da cabeça. Com a análise em regime transiente pretendeu-se avaliar os tempos envolvidos no aquecimento da cabeça de extrusão à temperatura de funcionamento. Para tal realizou-se uma simulação para o aquecimento de ABS à temperatura de funcionamento máximo de 240 °C.

4.3.2 Materiais e Métodos

O modelo geométrico do extrusor utilizado na simulação térmica é apresentado na Figura 4.14, figura esta representativa não correspondendo à posição de trabalho. A análise numérica iniciou-se pela caracterização das propriedades térmicas dos diferentes materiais utilizados nos diferentes componentes. Os valores das propriedades dos materiais utilizados foram retirados da biblioteca do próprio software, apresentados na Tabela 4.4.

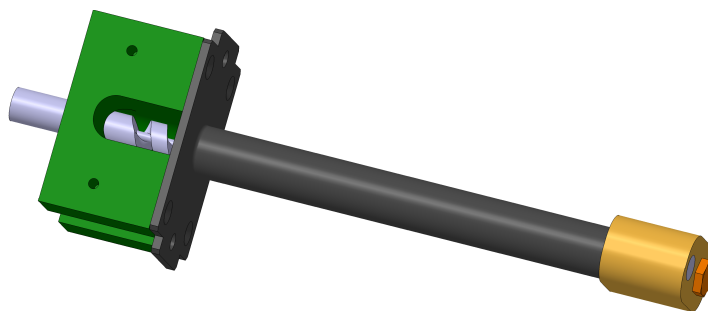


Figura 4.14: Modelo da cabeça da extrusora para análise térmica.

Tabela 4.4: Os valores das propriedades dos materiais utilizados.

Componente	Material	k [W/(m.K)]	cp [J/(kg.K)]
Bico de extrusão	Bronze	110	390
Bloco de aquecimento	Alumínio 1060	200	900
Suporte dos rolamentos	Alumínio 1060	200	900
Cartuxo de aquecimento	Aço Inox AISI 304	16	500
Cilindro de plastificação	Aço Inox AISI 304	16	500
Fuso de alimentação	Aço Inox AISI 304	16	500

Para o domínio de cálculo foi necessário criar uma malha tridimensional, com elementos tetraédricos com quatro nós. Na tabela 4.5 encontra-se toda informação relativamente a malha gerada para o análise térmico. A partir da Figura 4.15 é possível observar o modelo da cabeça com a malha de elementos finitos utilizado na simulação do mesmo.

Tabela 4.5: Caracterização da malha de elementos finitos.

Características	Valor
Nº de nós	1710332
Nº de elementos	343666
Tamanho máximo dos elementos	1.7 mm
Tamanho mínimo dos elementos	0.6 mm
Máximo da razão de aspeto	20



Figura 4.15: Modelo da cabeça com respetiva malha representada.

O contacto entre as peças foram definidos como "contacto global" e assim sendo a condutividade térmica é definida como perfeita ao longo das superfícies em contacto. Deve mencionar-se que as análises conduzidas em regime transiente e estacionário foram realizadas com convecção natural onde se considerou um coeficiente de convecção para o ar de $10 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e uma temperatura ambiente inicial de 22°C . Na análises considerou-se que o cartucho de aquecimento se mantinha a uma temperatura de 240°C , correspondente à temperatura de processamento do ABS definido. De modo a analisar o regime estacionário e transiente considerou-se que a convecção natural decorria apenas no exterior de todo o conjunto de extrusão. Na análise em regime transiente, foi imposta uma condição de fronteira, de potência calorífica, nas superfícies do bloco em contacto com o cartucho de aquecimento, identificado na Figura 4.2, a potência calorífica imposta nestas superfícies foi igual 34 Watts. Teoricamente, o cartucho de aquecimento deveria ter uma potência de 40 Watts, no entanto foi considerado um coeficiente de segurança de 15% para a eventualidade de a fonte de alimentação utilizada não ter a intensidade de corrente necessária para alimentar todo o sistema.

4.3.3 Resultados e discussão

Na fase de impressão, isto é, após a fase de aquecimento da cabeça de extrusão, analisada em termos de simulação térmica em regime estacionário foram avaliadas as situações em que a cabeça do extrusor funciona em convecção natural, estando estes resultados apresentados na Figura 4.16. A análise representa os gradientes registados das temperaturas, dada pelo aquecimento do cartucho. A simulação de convecção forçada não foi considerada pois um arrefecimento brusco do cilindro de plastificação levaria a que o granulado não conseguisse receber de uma forma eficiente o calor.

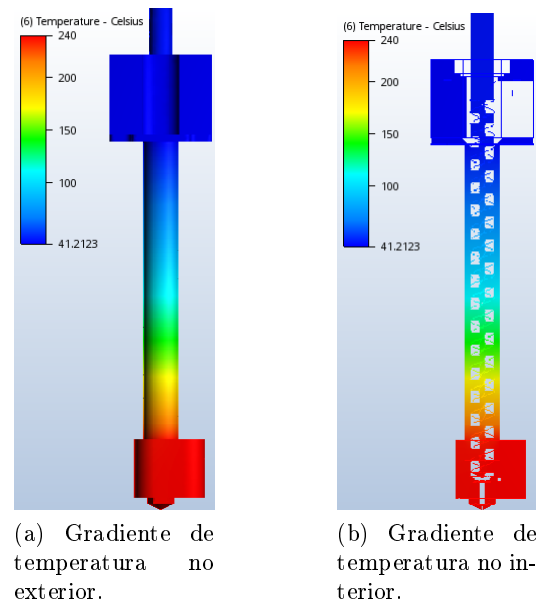


Figura 4.16: Gradiente de temperaturas.

A possibilidade de manter o bloco de aquecimento a uma temperatura constante também foi pensada no entanto optou-se por colocar o cartucho dado que assim a simulação se torna um pouco mais realista. Foram retirados do software valores exatos da temperatura ao longo do cilindro de plastificação, espaçados de 5 mm, estes pontos estão representados na 4.17, figura esta meramente ilustrativa não correspondendo a posição de trabalho, de modo a poder obter um gráfico da variação da temperatura ao longo do cilindro, Figura 4.18. De notar que as temperaturas à entrada do material granulado, segundo John Bozzelli (2015) devem rondar entre os 40 e 65 °C e na simulação efetuada tal se confirma uma vez que regista uma temperatura de aproximadamente 45°C. Esta gama de temperatura é necessária para haver o escoamento de gases voláteis o mais cedo possível no percurso de alimentação e prevenir assim que estes condensem e criem bolhas contidas no material. Isto também permitira uma melhor homogeneização do material. partir do grafico

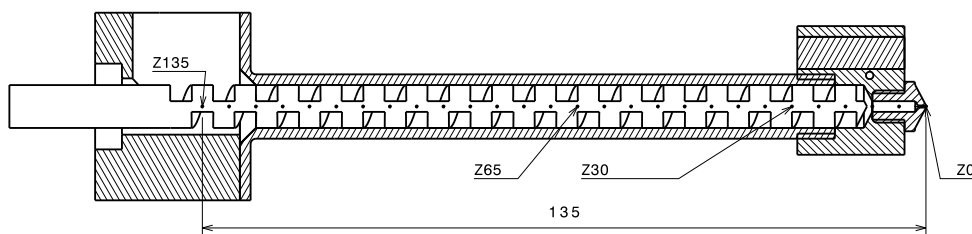


Figura 4.17: Representação dos pontos de medida.

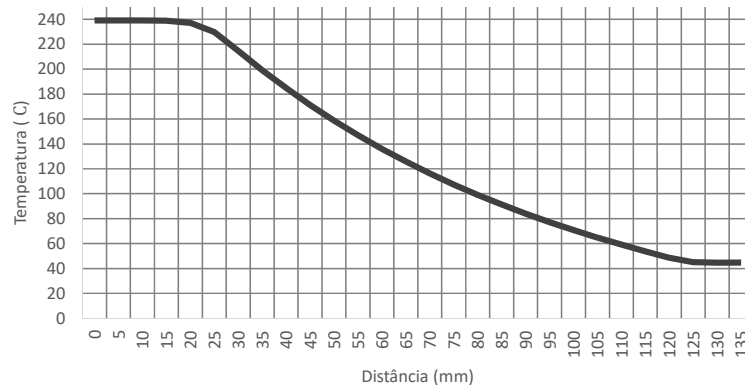


Figura 4.18: Curva da variação da temperatura ao longo da distância.

Na análise aos resultados em regime transiente, representativo do período de aquecimento da cabeça de extrusão entre a temperatura ambiente e os 240°C, foram registados os gradientes de temperaturas em 3 fases distintas a 60s, 360s e no instante em que o sistema estabiliza, 1250s, estes resultados são apresentados na Figura 4.19.

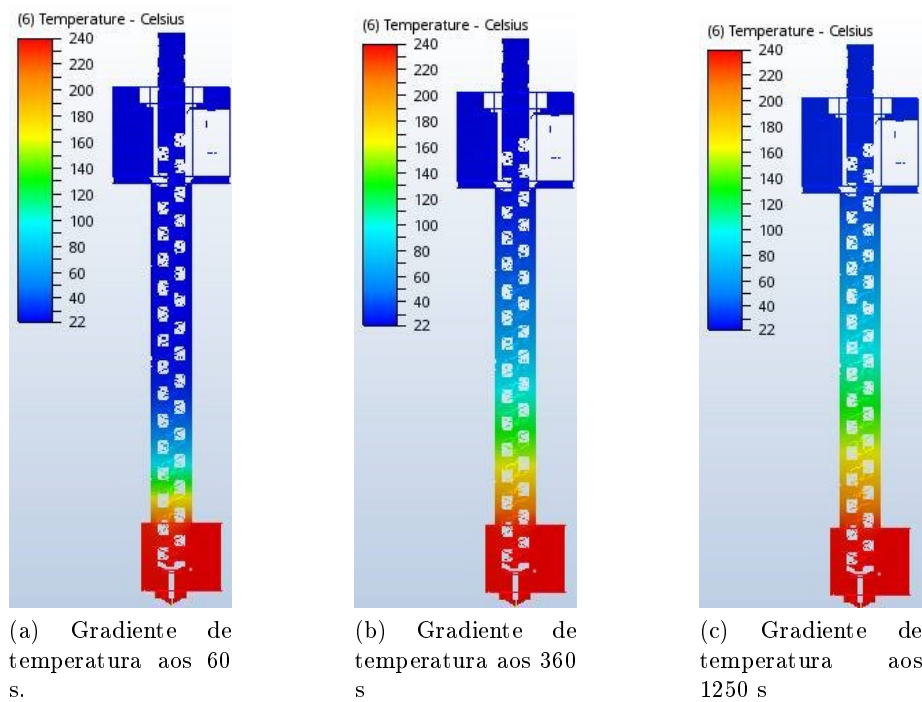


Figura 4.19: Evolução do gradiente de temperatura nos instantes descritos.

Na análise do regime transiente (fase de aquecimento) um tempo de 1250 segundos foi necessário para haver uma estabilização da temperatura. Em relação aos locais de interesse, à medida que a distância à face inferior do bico de extrusão aumenta a temperatura diminui, como seria expectável. O ponto mais distante, local de alimentação

de material (Z135) apresenta uma temperatura de aproximadamente 45 °C, enquanto na zona inferior, no bico de extrusão (Z0) apresenta uma temperatura de aproximadamente 240°C, sendo esta a temperatura de impressão. No ponto Z65 o cilindro e plastificação apresenta uma temperatura aproximadamente de 130°C. Pode-se verificar que evolução da temperatura apartir da distancia igual a 25 mm em é aproximadamente exponencial. A partir da Figura 4.18 também é possível identificar a que distancia do bico de extrusão ocorre transição vítrea do material, a 77 mm, assim como o fusão do mesmo, a 42 mm.

Relativamente ao tempo necessário para alcançar a temperatura de funcionamento uma impressora FDM convencional apresenta valores na ordem de 90 a 150 segundos no entanto devido a configuração do extrusor desenvolvido e o seu tamanho é de esperar que o tempo para a este seja relativamente maior. Como já foi referido o tempo necessário para aquecimento do extrusor é de 1250 segundos, aproximadamente 20 minutos.

4.4 Orçamento

Para poder atingir um dos objetivos principais do trabalho foi necessário realizar um orçamento para a construção da cabeça extrusora. Na Tabela 4.6, encontra-se os custos, a quantidade, a designação e a origem dos respetivos componentes da cabeça de extrusão.

Tabela 4.6: Orçamento da construção da cabeça de extrusão

Qt	Designação	Nº Peça	Origem	Preço Unitário	Total
1	Bico extrusor		Comercial	2,50 €	2,50 €
1	Bloco de aquecimento		Fabrico	100,00 €	100,00 €
1	Cartucho de aquecimento 40W		Comercial	5,20 €	5,20 €
1	Cilindro de Plastificação		Fabricado	75,00 €	75,00 €
1	Fuso de alimentação		Comercial	15 €	15€
1	Fúnil		Fabricado	8,00 €	8,00 €
1	Suporte do fúnil		Fabricado	45,00 €	45,00 €
1	Motor Nema17 com redutor 5:1		Comercial	36,00 €	36,00 €
1	Termístor 100k NTC 3950		Comercial	1,20 €	1,20 €
1	Acoplador rígido		Comercial	4,00 €	4,00 €
1	Suporte cilindro		Comercial	5,00 €	5,00 €
1	Rolamento 688DD		Comercial	3,00 €	3,00 €
1	Suporte da cabeça extrusora		Fabricado	10,00 €	10,00 €
1	Maquinagem		Fabricado	250,00 €	250,00 €
				TOTAL	559,90 €

Procedeu-se de forma similar para o cálculo da estrutura e das restantes peças da impressora (ver Tabela 4.7). Para alguns componentes, os preços foram recolhidos online, ora a partir de sites de venda, ora através de consulta direta de fabricantes.

O preço total da impressora é o somatório do orçamento da cabeça extrusora da estrutura da impressora, totalizando a quantia de 1287.00 euros. O valor da impressora

encontra-se acima do valor inicialmente esperado, embora este ainda seja inferior ao preço do concorrente principal, *David*. Tendo como referência o valor de 900 euros definido na matriz QFD, a estimativa obtida é claramente elevada. Esta ligeira discrepância deve-se ao fato que o valor compra analisado das peças desenvolvidas serem peças unitárias e que, quando produzidas em série, poderão diminuir significativamente o seu custo de produção. Adicionalmente, se as peças comerciais analisadas forem compradas em grandes quantidades, o valor das mesmas também diminuirá significativamente, tornando assim o valor final da impressora inferior ao orçamento apresentado.

Tabela 4.7: Orçamento da construção da impressora 3D.

Qt	Designação	Nº Peça	Origem	Preço Unitário	Total
1	Molduras estéticas e acrílicos	44, 45, 46, 47	Comercial	35,00 €	35,00 €
1	Estruturas em chapa cortada e quinada	49, 50, 51, 52, 55, 61, 62, 64, 65	Comercial	200,00 €	200,00 €
2	Perfil de Alumínio 30x30	18	Comercial	4,20 €	8,40 €
1	Cama quente	19	Comercial	22,00 €	22,00 €
3	Mola	20	Comercial	0,20 €	0,60 €
4	Motor NEMA 17	21	Comercial	12,00 €	48,00 €
4	Veios de deslizamento 10 mm	22	Comercial	15,00 €	60,00 €
2	Guia Linear	23	Comercial	25,00 €	50,00 €
2	Patins para Guia Lineares	24	Comercial	21,00 €	42,00 €
4	Polia lisa com rolamento Gt20.2	25	Comercial	2,20 €	8,80 €
2	Polia com rolamento Gt20.2	26	Comercial	4,40 €	8,80 €
2	Polia dentada Gt20.2	27	Comercial	3,50 €	7,00 €
8	Rolamento Linear LM10UU	28	Comercial	3,00 €	24,00 €
2	Fuso trapezoidal 8mm)	29	Comercial	26,00 €	52,00 €
6	Porca T para perfil alumínio 30x30	30	Comercial	2,00 €	12,00 €
2	Acoplador Rígido entre eixo do motor e fluxo	31	Comercial	6,00 €	12,00 €
1	Correia	32	Comercial	3,00 €	3,00 €
4	Amortecedores dos motores	33	Comercial	3,50 €	14,00 €
1	Base de apoio a mesa de aquecimento	34	Comercial	15,00 €	15,00 €
4	Dobradiça da porta frontal	35	Comercial	1,00 €	4,00 €
1	Fecho da Porta frontal	36	Comercial	3,00 €	3,00 €
1	Caixa de proteção do Ecrã LCD	37	Comercial	2,00 €	5,00 €
1	Ecrã LCD	38	Comercial	10,00 €	10,00 €
1	Conexão da alimentação e interruptor <i>on/off</i>	39	Comercial	2,00 €	2,00 €
1	Fonte de Alimentação	40	Comercial	35,00 €	35,00 €
1	Controlador Arduino Mega 2560 + RAMPS 1.4	41	Comercial	30,00 €	30,00 €
1	Perfil de Borracha	42	Comercial	1,00 €	1,00 €
2	Porca T para o fuso trapezoidal	43	Comercial	2 €	4,00€
				TOTAL	737,28 €€

4.5 Desenho de Conjunto e de Definição

Os desenhos de conjunto encontram-se no Anexo D referente à cabeça extrusora e da impressora 3D, propriamente dita. Foi também realizado desenhos de definição dos componentes mais importantes para a extrusão do material granular (Anexo E)

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1 Conclusão

Através do trabalho desenvolvido nesta dissertação pode-se concluir que a tecnologia de impressão FDM é de grande interesse do ponto de vista de utilização por parte de profissionais, mas também de modo a que seja facilmente utilizado pelo utilizador comum. Foi possível identificar vários fabricantes de equipamentos que apresentam soluções para diferentes tipos de utilização/necessidade que vão desde a temática "construa você mesmo" (*diy - do it yourself*) e soluções profissionais/industriais.

Foi também possível concluir que a impressão FDM através de material granulado está a despertar um grande interesse por parte de utilizadores que utilizam esta tecnologia, pois esta permite gerar impressões mais económicas, dado o baixo custo do material granulado em comparação ao filamento. No entanto este tipo de impressão por material granular ainda se encontra numa fase muito embrionária do seu desenvolvimento. Da análise de *benchmarking* conclui-se que existe apenas uma solução comercial oferecendo esta possibilidade, mas que só agora está a chegar ao mercado, havendo por isso uma limitada fonte de informação acerca deste tipo de impressão. Dito isto conclui-se assim que este tema é oportuno, dado a atual conjuntura política, a nível ambiental, e económica, de redução de custos e processos, o que justifica o trabalho desenvolvido na obtenção de um sistema de impressão por material granular e de baixo custo, apresentado no âmbito desta dissertação.

Pode-se concluir que a integração dos processos de simulação numérica, tanto a nível estrutural e térmico deve ser utilizado no processo de desenvolvimento deste tipo de tecnologia, uma vez que possibilita a confirmação de várias soluções e prevenção de possíveis cenários, de modo a assegurar o correto funcionamento da impressora. Esta análise permite assim identificar e precaver possíveis contratempos que de outra forma não poderiam ser identificados, contribuindo assim para uma redução do tempo e custo do desenvolvimento do projeto.

Não tendo sido possível construir a impressora projetada, nem possível testar na prática o processo de impressão de uma peça extrudida por material granular, o funcionamento estrutural e térmico foi exclusivamente assegurado pelas simulações numéricas respetivas, sendo estes resultados obtidos comparados a produtos existentes no mercado e cálculos analíticos. Prevê-se assim que existe de facto a possibilidade de impressão através de granulado, no entanto existem algumas dúvidas a nível estrutural, sendo estas apenas possíveis de avaliação através de realização de experiências empíricas, ou seja, da criação de um protótipo.

Como conclusão desta dissertação, pode-se afirmar que o desenvolvimento de um equipamento de impressão 3D por alimentação de granulado gera uma grande cooperação de varias áreas de engenharia, nomeadamente áreas de materiais, automação, desenvolvimento do produto e mecânica que o torna num grande desafio, embora necessário para a satisfação de eventuais necessidades do mercado.

5.2 Trabalhos Futuros

Com base no trabalho desenvolvido nesta dissertação, são recomendadas alguns trabalhos futuros de modo a otimizar o processo do modelo presente e futuros desenvolvimentos.

Estudar e melhorar as impressoras 3D, nomeadamente o processo de impressão 3D através de material granulado, uma vez que esta área ainda está pouco explorada em relação a material em forma de filamento. Visando a criação de mais equipamentos deste tipo, por forma a que a competitividade deste possibilite a sua redução de preço, assim como, se torne uma solução competitiva á impressão tradicional.

Relativamente ao trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação, recomenda-se a realização de mais simulações numéricas de modo a precaver alguma situação não avaliada, a realização do projeto de automação do mesmo e finalmente a criação de um protótipo de modo a testar e avaliar a solução apresentada, através de uma solução empírica para que assim a impressora seja dada como uma solução viável a impressão 3D convencional.

Bibliografia

3D Hubs (2016a). 2016 Best 3D Printer Guide. Acedido em Setembro de 2016 de: <https://www.3dhubs.com/best-3d-printer-guide#plugnpay-beethefirst>.

3D Hubs (2016b). What is 3D Printing? The definitive guide - 3D Hubs. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://d2xsqsnb4fq1ex.cloudfront.net/sites/all/themes/hubs3d/images/landingpage/3d-101/basics/graph-sales-printers.jpg>.

3D Printing Industry (2016). The Free Beginner's Guide - Processes - 3D Printing Industry. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/processes/>.

3dmaker (2016). Driver motore passo passo StepStick A4988. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.3dmaker.systems/it/reprap/135-driver-stepstick-a4988-stepper-motor.html>.

3dxtusionlab (2016). 2X 8mm OD 300mm Hardened Rod Rail Shaft 4 LM8UU Linear Bearing for 3D Printer-eBay. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.ebay.com/itm/2x-8mm-OD-300mm-hardened-rod-rail-shaft-4-LM8UU-linear-bearing-for-3d-printer-/331807932360>.

Akao, Y. (1996). *Manual de aplicação do desdobramento da função qualidade (volume 1)-Introdução ao desdobramento da qualidade*. Tradução de Zelinda Tomie Fujikawa, Seiichiro Takahashi. Belo Horizonte: UFMG, Escola de Engenharia, Fundação Cristiano Ottoni.

Aleph Objects (2016). LulzBot TAZ 5. Acedido em Setembro de 2016 de: <https://www.lulzbot.com/store/printers/lulzbot-taz-5>.

Alibaba (2016a). 8mm impressora 3d rosca trapezoidal- Alibaba. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail-img/china-atacado-oem-8mm-impressora-3d-rosca-trapezoidal-parafuso-de-avan-o-com-porca-de-lat-o-60500883475.html>.

- Alibaba (2016b). Aquecedor De Silicone. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://pt.aliexpress.com/item/200x200mm-230v-200W-Silicone-Heater-Silicone-Heating-Pad-With-3M-adhesive-abd-NTC-thermistor/32411670258.html?spm=2114.42010508.4.28.H5l2AZ>.
- Alibaba (2016c). SSWD Pad rubber Machine feet pads,rubber damper - Aliexpress.com | Alibaba Group. Acedido em Outubro de 2016.
- Alves, F. (2014). *Análise e Otimização do Processo Fused Filament Fabrication*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Bak, D. (2003). Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter. *Assembly Automation*, 23:340–345.
- Barão e Costa (2016). Varao Roscado M12x1mt Inox. Acedido em Outubro de 2016, de:<http://www.baraoecosta.pt/catalogo/detalhe/26865>.
- BQ (2016a). HeatCore DDG Extruder Kit - BQ. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://store.bq.com/pt/heatcore-ddg-extruder-kit>.
- BQ (2016b). Impressora 3D BQ Hephestos 2 . Acedido em Setembro de 2016 de: <https://www.bq.com/pt/hephestos-2>.
- Campbell, I., Bourell, D., e Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, 18:255–258.
- Casagrande, M. (2013). *Projeto de um cabeçote de extrusão de uma máquina de prototipagem rápida FDM*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Completo, A. (2012). Apontamentos da disciplina de Projecto e Engenharia de Produto, do Mestrado de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.
- Craft Unique (2016). Direct or bowden - how the filament gets to the hot end?. Acedido em Outubro de 2016, de:<http://blog.craftunique.com/direct-bowden-how-the-filament-gets-to-the-hot-end/>.
- Crump, S. S. (1992). Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects.
- Csillag, J. M. (1995). *Análise do valor: metodologia do valor*. Atlas.
- Deckard, C. R. (1986). Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering, Us Patent 4 863 538.
- Dhgate (2016). 2016 New Ramps1.4 Lcd 12864 Lcd Control Panel 3d Printer Smart Controller Dbp_001 From Hgseo - Dhgate. Acedido em Outubro

- de 2016, de: <http://www.dhgate.com/product/new-ramps1-4-lcd-12864-lcd-control-panel/248975934.html>.
- Dieter, G. E. (2000). Engineering design: a materials and processing approach. *McGraw-Hill series in mechanical engineering*.
- Eppinger, S. D. e Ulrich, K. T. (2000). Product design and development. *Product design and development*.
- Ferreira, R. (2013). Beethefirst: a impressora 3D portuguesa para a dona de casa e para o engenheiro. Acedido em Setembro de 2016, de: http://tek.sapo.pt/multimedia/artigo/beethefirst_a_impressora_3d_portuguesa_para_a_dona_de_casa_e_para_o_engenheiro-1342194tek.html.
- Flashforge Creator USA (2016). Flashforge Creator Pro 3D Printer. Acedido em Setembro 2016 de: <http://www.flashforge-usa.com/creator-pro/>.
- Flávia Saad (2016). Extrusão de alumínio,Manutenção & Suprimentos. Acedido em Setembro de 2016, de: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/7697-extrusao-de-aluminio/>.
- Garg, A., Tai, K., e Savalani, M. (2014). State-of-the-art in empirical modelling of rapid prototyping processes. *Rapid Prototyping Journal*, 20:164–178.
- Google (2016). End stops - 3D printer list. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://sites.google.com/site/3dprinterlist/electronics/end-stops>.
- Graça, D. (2012). *Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por TDP*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Grenda, E. (2012). Additive Manufacturing: What RP will be when it grows up. Technical report.
- Grimm, T. (2004). *User's Guide to Rapid Prototyping*. Society of Manufacturing Engineers 987654321.
- Hampton Controls (2016). Mineral Insulated Element Thermocouples by Hampton Controls. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://hamptoncontrols.com/thermocouples-rtds/mineral-insulated-element-thermocouples/>.
- Hill, A. V. (2012). *The encyclopedia of operations management: a field manual and glossary of operations management terms and concepts*. FT Press.

- Hughes, N. (2014). Hands on with MakerBot's iOS-connected 5th generation of 3D printers & Digitizer desktop 3D scanner. *Apple Insider*.
- Hull, C. W. (1986). Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography, US Patent 4 575 330.
- Ibusuki, U. e Kaminski, P. C. (2007). Product development process with focus on value engineering and target-costing: A case study in an automotive company. *International Journal of Production Economics*, 105(2):459–474.
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., e Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th ed.* John Wiley and Sons.
- Inventables (2016). Stepper Motor - NEMA 17. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://www.inventables.com/technologies/stepper-motor-nema-17>.
- John Bozzelli (2015). Injection Molding: Why Pellet Size and Shape Are Important : Plastics Technology. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.ptonline.com/columns/injection-molding-why-pellet-size-and-shape-are-important>.
- Kneissl, W. (2015). 3D Printing : An Overview. Acedido em Fevereiro de 2016, de <http://www.idtechex.com/research/webinars/3d-printing-an-overview-00004.asp>.
- Langnau, L. (2012). A closer look at extrusion-based 3D printers. Acedido em Março de 2016, de <http://www.makepartsfast.com/2012/05/3734/a-closer-look-at-extrusion-based-3d-printers/>.
- Lee, Y.-C. e Huang, S.-Y. (2009). A new fuzzy concept approach for Kano's model. *Expert Systems with Applications*, 36(3, Parte 1):4479–4484.
- Limberg, T. (2008). *Examining Innovation Management from a Fair Process Perspective*. Gabler, Wiesbaden.
- Llimatech (2016). Astrosyn NEMA17 Motor Damper - llama tech. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.llimatech.be/shop/nl/stappenmotoren-accessoires-/108-astrosyn-nema17-motor-damper.html>.
- Loja de Resistências (2016). Resistência Tubular Para Estufa Tipo Aletada. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.lojaderesistencias.com.br/inicio/42-resistencia-tubular-para-estufa-tipo-aletada.html>.
- Make (2015). The Winners from Make:’s Digital Fabrication Shootout. Acedido em Setembro de 2016, de: <http://makezine.com/2015/11/04/digital-fabrication-shootout-winners/>.

- Makerbot (2016). Replicator Desktop 3D Printer (5th Generation). Acedido em Agosto de 2016, de: <https://store.makerbot.com/printers/replicator>.
- Makergear (2016). About Us - MakerGear - Precision Desktop 3D Printing Tools & Accessories. Acedido em Setembro de 2016 de: <http://www.makergear.com/pages/about>.
- Manrich, S. (2005). *Processamento de Termoplásticos : rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes*. São Paulo.
- Matias, J. (2007). *Simulação e optimização de processos estereolitográficos*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- MatterHackers (2016). 3D Printer Filament Comparison - MatterHackers. Acedido em Outubro, de: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>.
- Mercado Livre (2016). Estrutura (frame) Imp.3d Prusa I3 Graber Acrílico - Cristal. Acedido em Setembro de 2016, de: http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-707896412-estrutura-frame-imp3d-prusa-i3-graber-acrilico-cristal-_JM.
- Morales, G. (2009). *Projeto de Moldes para Termoplásticos*. São Paulo.
- Olabisi, O. e Adewale, K. (2016). *Handbook of thermoplastics*, volume 41. CRC press.
- Petervaldivia (2015). Fabrication of Plastics. Petervaldivia. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.petervaldivia.com/fabrication-of-plastics/>.
- Pirjan, A. e Petrosanu, D. (2013). The Impact of 3d Printing Technology on the Society and Economy. *Journal of Information Systems and Operations Management*, 7(2):360–370.
- Printersketch 3d (2016). Cartucho Aquecedor 12v 40W para Bico Impressora 3D - PRINTERSKETCH 3D. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://printersketch3d.lojaintegrada.com.br/cartucho-aquecedor-12v-40w-p-bico-impressora-3d>.
- Project2R (2015). PC Cooling Pt. 3: Estratégias activas de dissipacao de calor Project 2R. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://project2r.com/2015/02/25/pc-cooling-pt-3-estrategias-activas-de-dissipacao-de-calor/>.
- Reis, J. (2016). *Desenvolvimento e projeto de impressora DMF para impressão multicolor*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- RepRap (2014). MK8 Extruder - Geeetech Wiki. Acedido em Outubro de 2016, de: http://www.geeetech.com/wiki/index.php/MK8_Extruder.

- RepRap (2015). Rambo - RepRapWiki. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://reprap.org/wiki/Rambo>.
- RepRap (2016a). PCB Heatbed - RepRapWiki. Acedido em Outubro de 2016, de: http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed.
- RepRap (2016b). RepRap - RepRapWiki. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://reprap.org/>.
- RepRap (2016c). RepRapDiscount Smart Controller - RepRapWiki. Acedido em Outubro de 2016, de: http://reprap.org/wiki/RepRapDiscount_Smart_Controller.
- RepRap (2016d). RUMBA - RepRapWiki. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://reprap.org/wiki/RUMBA>.
- Rios, P. D. A. (2014). *Conceção, Desenvolvimento e Projeto de uma Bicileta Multimodo*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
- Rollon (2016). Re-circulating ball profiled linear rails, Mono Rail - Rollon. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.rollon.com/IN/en/products/linear-line/16-mono-rail/>.
- Sculpteo (2015). The State of 3D Printing. Acedido em Agosto de 2016, de: http://www.sculpteo.com/static/0.30.0-64/download/report/Sculpteo_State_of_3D_Printing.pdf.
- Sculptify (2016). Introducing David. Acedido em Agosto de 2016, de: <http://sculptify.com/pages/david>.
- Simões, J. e Relvas, C. (2009). Apontamentos da disciplina de Conceção e Fabrico Assistidos por Computador, do Mestrado de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.
- Smart Sensors (2016). RTD, High Accuracy and Sanitary Thermocouples RTDS - Smart Sensors Inc. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.smartsensors.com/rtd.htm>.
- Soluções Industriais (2016). Servo motor Sanyo Denki - Confiman. Acedido em Outubro de 2016, de: http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instalacoes_e_equipamento_industrial/confiman/produtos/maquinas-ferramenta/servo-motor-sanyo-denki.
- Sun, Q., Rizvi, G., Bellehumeur, C., e Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2):72-80.

- Tec3D (2016). Kit correia com polia Gt2 20 Dentes p/ impressora 3D - Tec3D Online. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.tec3donline.com.br/produto/kit-correia-com-polia-gt2-20-dentes-p-impressora-3d.html>.
- Tecnofactorum (2016). Marco 6mm impresora 3D Prusa i3 con agujeros roscados RepRap. Acedido em Setembro de 2016, de: <http://shop.tecnofactorum.com/mecanica3d/9-marco-y-base-aluminio-roscado-prusa-i3.html>.
- Ulrich, K. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24(3):419–440.
- Ultimaker (2016). About Ultimaker. Acedido em Setembro de 2016, de: <https://ultimaker.com/en/about-ultimaker>.
- Venuvinod, P. K. e Ma, W. (2004). *Rapid Prototyping, Laser based and Other Technologies*. Kluwer Academic Publishers.
- Wikipedia (2016). Termístor - Wikipédia, a enciclopédia livre. Acedido em Outubro de 2016, de: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Termistor>.
- Womer, T. (2011). The Evolution of screw design technology for the Injection Molding Process. Acedido em Outubro de 2016, de: <http://www.plasticstrends.net/index.php/component/content/article/1-this-month/320-the-evolution-of-screw-design-technology-for-the-injection-moldi>.
- Yan, X. e Gu, P. (1996). A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design*, 28(4):307–318.
- Zhang, S. (2014). *Location Analysis of 3D Printer Manufacturing Industry*. Tese de mestrado, Faculdade de Arquitectura e Planeamento, Universidade da Colômbia.

Apêndice A

Análise Comparativa dos Produtos de *Benchmarkrting*

Tabela A.1: Análise Comparativa.

Autoria	Sculptify	Makerbot	Ultimaker	BQ
Especificações	David	Makerbot Replicator	Ultimaker 2+	Prusa I3 Hephestos 2
Tecnologia	FLEX	FDM	FFF	FFF
Velocidade de Impressão (mm/s)	10-150	-	30-300	Até 200
Resolução da Impressão (µm)	100	100-300	20-200	50 -300
Volume de Impressão (mm)	200 x 220 x 185	252 x 199 x 150	223 x 223 x 205	210 x 297 x 220
Temperaturas Admissíveis Pelo Extrusor (°C)	330	-	180-260	250
Temperaturas Admissíveis da Cama Quente (°C)	200	-	50-100	-
Altura da impressora (mm)	620	410	588	661
Largura da impressora (mm)	502	441	342	605
Comprimento da impressora (mm)	538	528	493	450
Altura do extrusor (mm)	-	-	-	75
Largura do extrusor (mm)	-	-	-	85
Comprimento do extrusor (mm)	-	-	-	65
Peso da impressora (kg)	29	16	11,3	16
Potência De Aquecimento do Extrusor	-	-	-	40
Potência Total Da Impressora (W)	-	100	221	100
Capacidade de Armazenamento de Material (kg)	0,56	-	0,75	1
Motores de passo	Passo de 1.8° com mínimo de 1/6 micro-passos	Passo de 1.8° com mínimo de 1/16 micro-passos	-	-
Materiais de construção	Alumínio, Poli-carbonato	Aço, PC/ABS	-	Alumínio
Conectividade	USB, Cartão SD	Wi-Fi, USB e Ethernet	USB, Cartão SD	USB, Cartão SD
Precisão de posicionamento no eixo Z (µm)	3	2,5	5	-
Precisão de posicionamento nos eixos XY (µm)	8	11	12,5	-
Cama Aquecida	Sim	Não	Sim	Não
Software Open-Source	Sim	Não	Sim	Sim
Hardware Open-Source	Não	Não	Sim	Sim
Ruído (dBA)	-	-	50	-
Custo (€)	2 460	1 790	1 895	850

Tabela A.2: Análise comparativa, continuação.

Autoria	Aleph Objects	Makergear	FlashForge USA	BEEVERYCREATIVE
Especificações	Lulzbot TAZ 5	Makergear M2	FlashForge Creator Pro	BEETHEFIRST
Tecnologia	FDM	FFF	FDM	FFF
Velocidade de Impressão (mm/s)	30–200	80–200	40–100	–
Resolução da Impressão (μm)	75–500	50–250	100 –500	50 –300
Volume de Impressão (mm)	290 x 275 x 250	200 x 250 x 200	225 x 145 x 150	190 x 135 x 125
Temperaturas Admissíveis Pelo Extrusor ($^{\circ}\text{C}$)	300	300	280	–
Temperaturas Admissíveis da Cama Quente ($^{\circ}\text{C}$)	120	110	120	–
Altura da impressora (mm)	515	420	381	400
Largura da impressora (mm)	680	610	320	140
Comprimento da impressora (mm)	520	533	467	400
Altura do extrusor (mm)	–	–	–	–
Largura do extrusor (mm)	–	–	–	–
Comprimento do extrusor (mm)	–	–	–	–
Peso da impressora (kg)	11	12,7	22,7	10,5
Potência De Aquecimento do Extrusor	–	40	–	–
Potência Total Da Impressora (W)	500	360	–	90
Capacidade de Armazenamento de Material (kg)	–	1	–	0,33
Motores de passo	–	–	Passo de 1.8° com mínimo de 1/16 micro-passos	
Materiais de construção	Alumínio	Aço, Alumínio	Aço, Alumínio, Acrílico	Acrílico,Aço
Conectividade	USB, Cartão SD	USB, Cartao SD	USB, Cartão SD	USB
Precisão de posicionamento no eixo Z (μm)	–	–	2,5	–
Precisão de posicionamento nos eixos XY (μm)	–	–	11	–
Cama Aquecida	Sim	Sim	Sim	Não
Software Open-Source	Sim	Sim	Sim	Sim
Hardware Open-Source	Sim	Sim	Sim	Não
Ruido (dBA)	–	–	–	–
Custo (€)	1 665	1 625	800	1 299

Apêndice B

Questionário Realizado

Desenvolvimento e protejo de uma impressora de Deposição de Material Fundido com alimentação por material granulado

Este inquérito está a ser realizado no âmbito da dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, intitulada "Desenvolvimento e protejo de uma impressora de Deposição de Material Fundido com alimentação por material granulado", com o objectivo de identificar as necessidades dos utilizadores.

*Required

1. 1- Indique a sua idade. *

.....

2. 2- Escolha o seu Género. *

- ☐ Feminino
☐ Masculino

3. 3- Quais os motivos pelos quais usa/usaria uma impressora 3D? *

- ☐ Materialização de ideias e conceitos
☐ Protótipos
☐ Produção
☐ Arte
☐ Moda
☐ Hobby
☐ Educação
☐ Amostras

4. 4- Para além dos requisitos normais que uma impressora 3D deve contemplar, que funcionalidades gostaria de encontrar numa impressora 3D ? *

- ☐ Capacidade em simultâneo de impressão através de granulado ou por fio
☐ Cama automaticamente nivelada
☐ Cama Aquecida
☐ Outro:

Figura B.1: Questionário realizado.

5. 5- Que fatores consideraria na compra de uma impressora 3D? *

.....

.....

.....

.....

6. 6- Que melhorias ou funções aplicava na sua impressora 3D?

Caso possua ou tenha experiência com Impressoras 3D

.....

.....

.....

.....

7. 7- (Por favor indique o nível de importância que atribui, numa escala 1 (pouco importante); 5 (muito importante), as seguintes características.) *

	1	2	3	4	5
Simples, Fácil manutenção	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Robustez, durabilidade	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Leveza, Conforto	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Design Apelativo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Baixo Custo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Adaptável, Ajustável	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Uso de materiais recicláveis	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

8. 8- Quanto estaria disposto a pagar por uma impressora 3D? *

.....

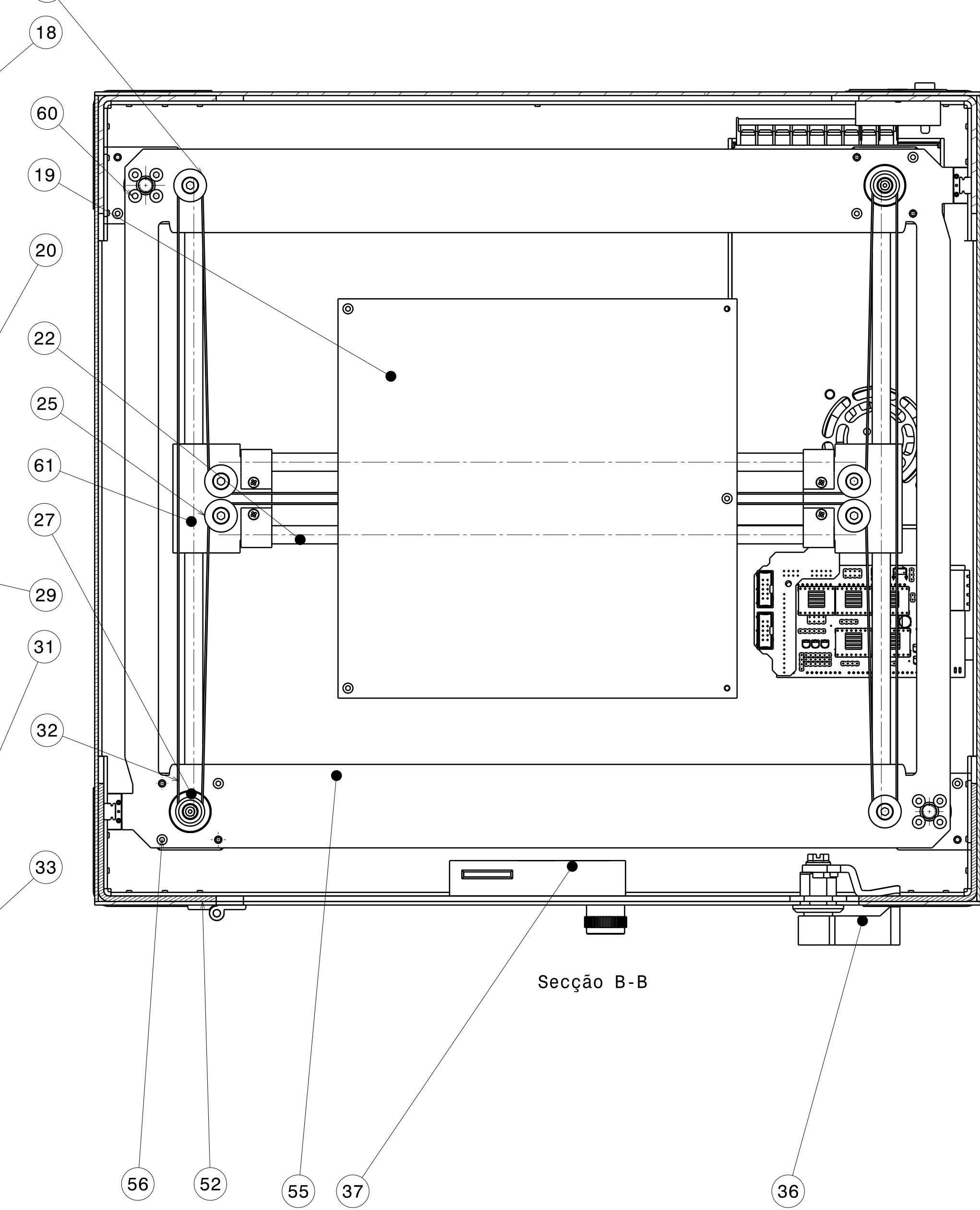
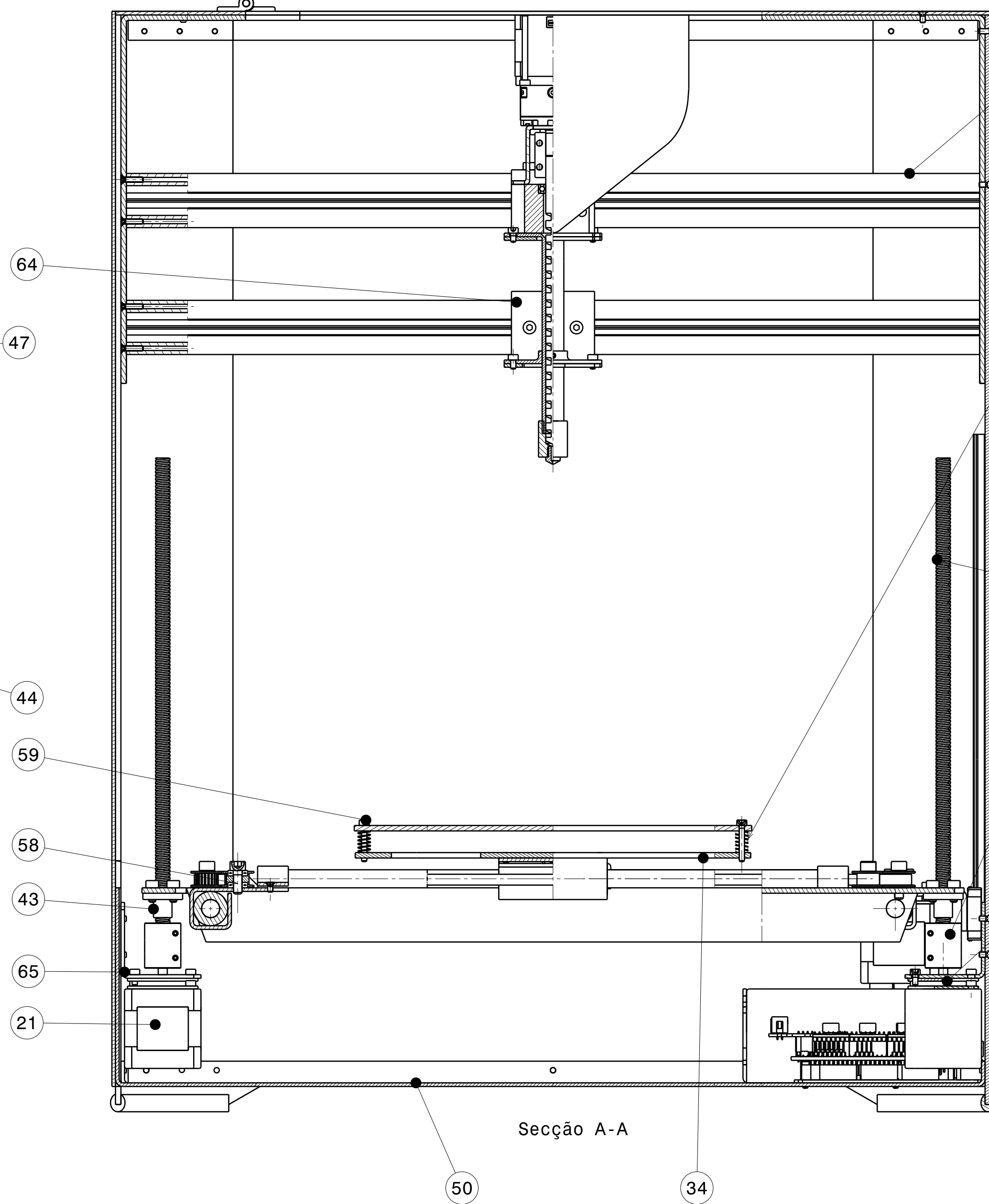
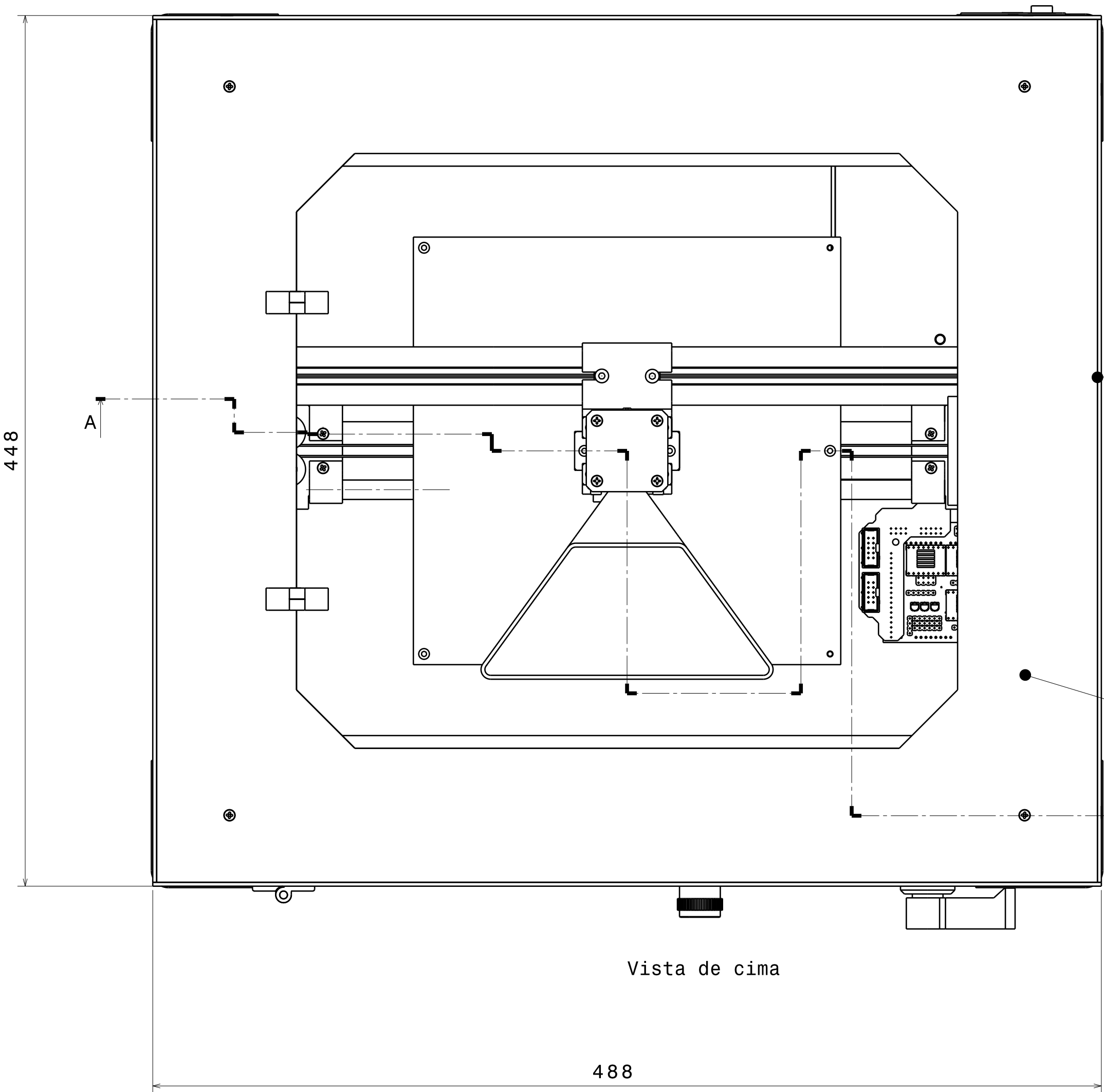
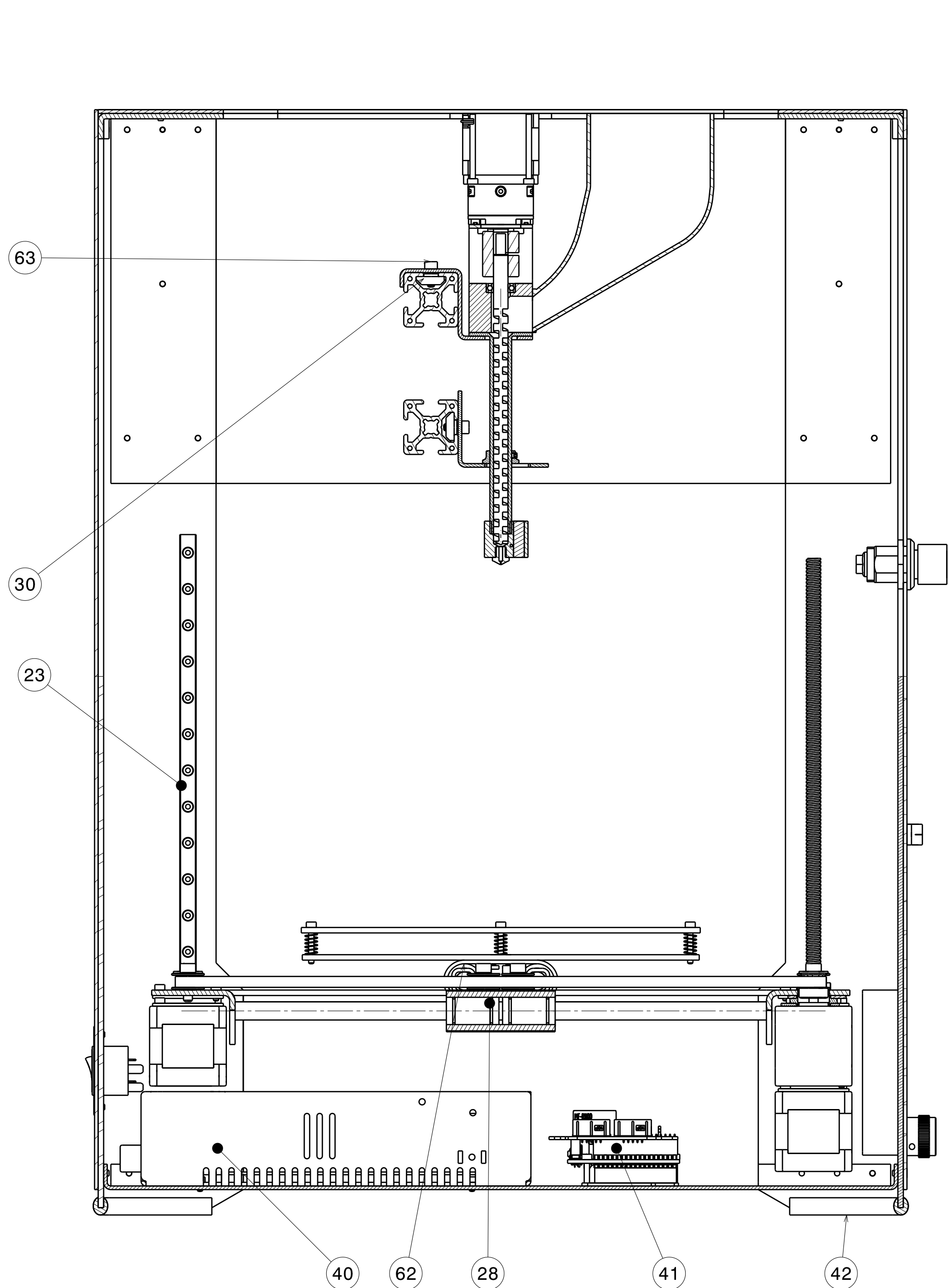
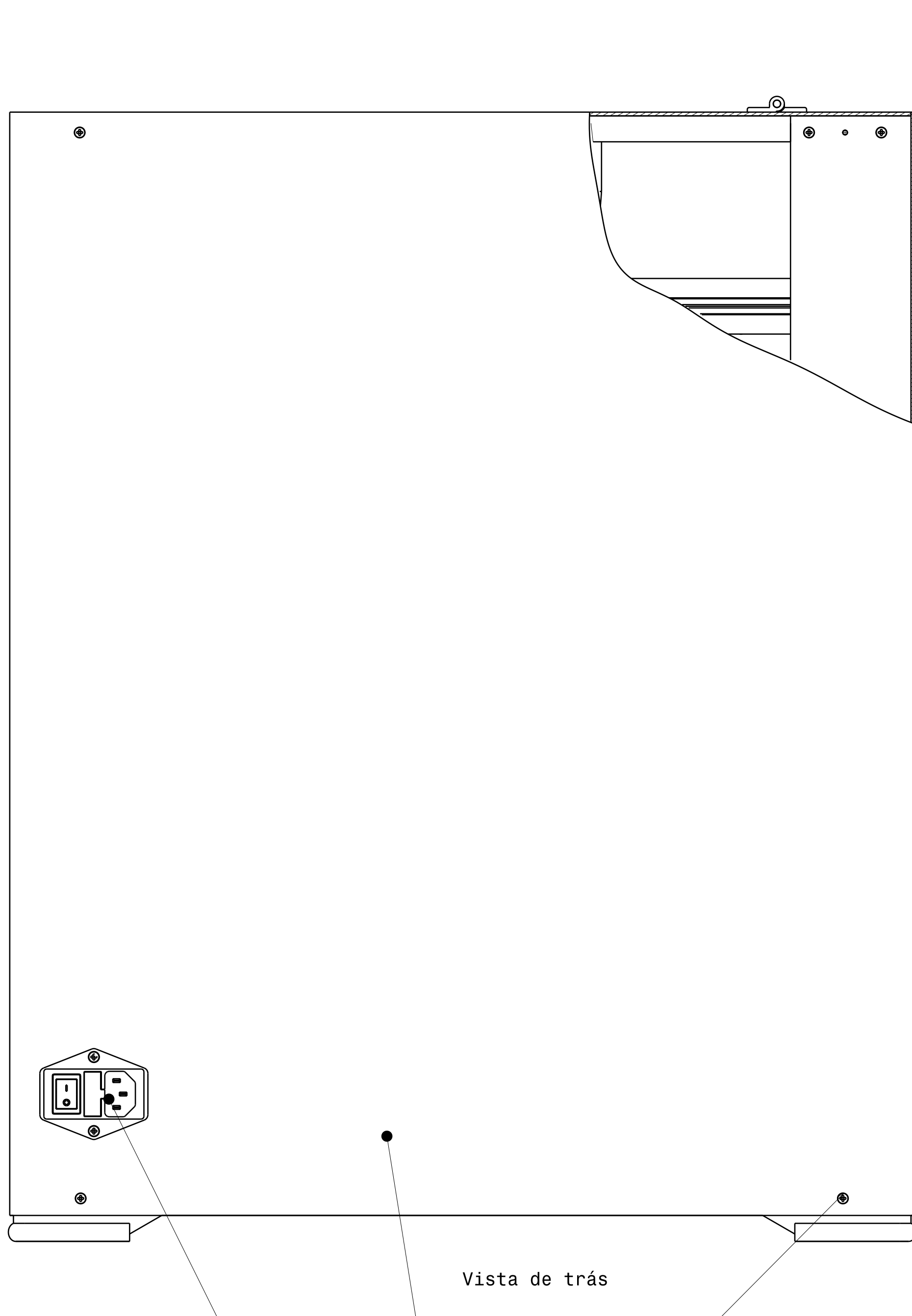
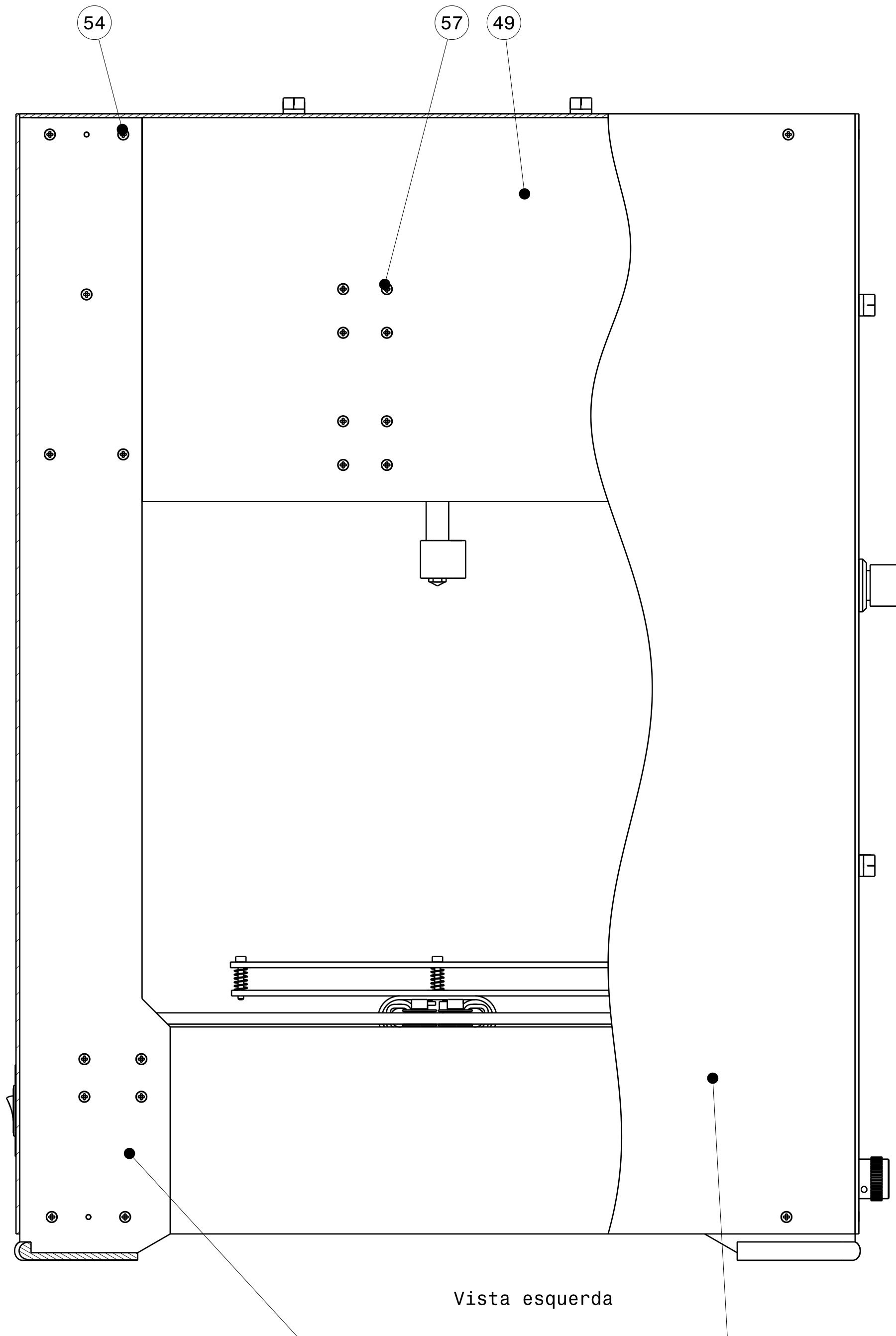
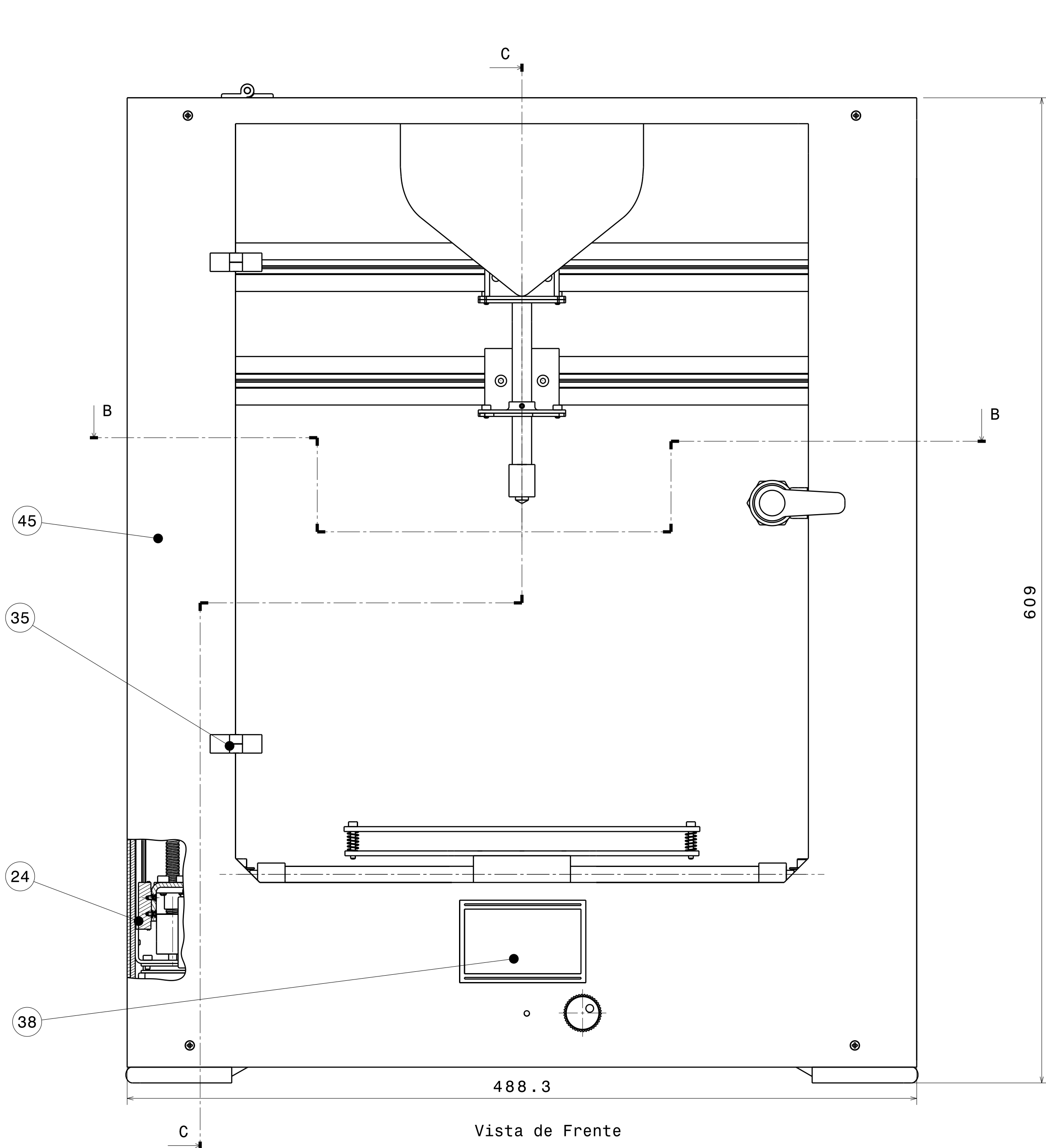
Figura B.2: Questionário realizado (Continuação).

Apêndice C

Matriz QFD

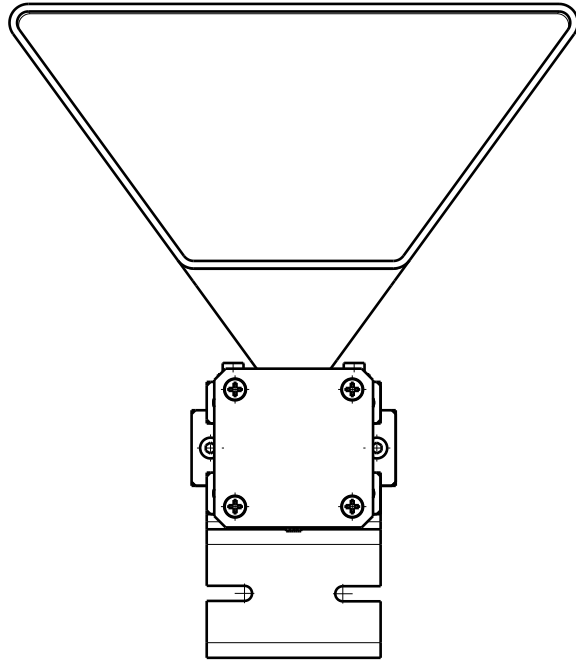
Apêndice D

Desenhos de Conjunto

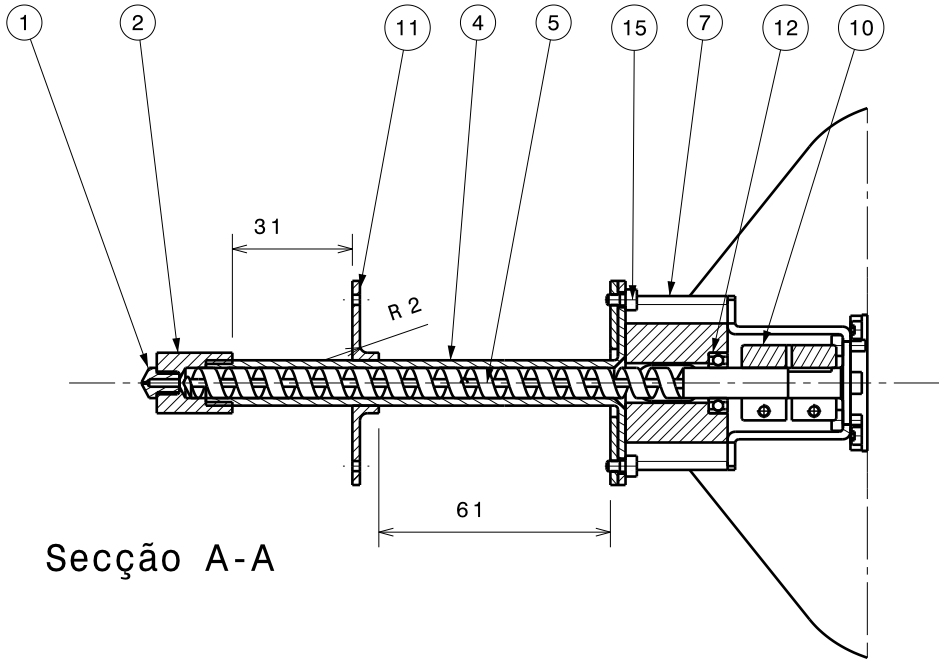


Qt	Nº	Designação	Material
2	18	Perfil de Alumínio 30x30	Alumínio
1	19	Cam quente	Alumínio
3	20	Mola	Aço
4	21	Motor NEMA 17	-
4	22	Veios de deslizamento 10 mm	Aço
2	23	Guia Linear	Aço
2	24	Patins para Guia Lineares	Aço
4	25	Polia lisa com rolamento Gt20.2	Latão
2	26	Polia com rolamento Gt20.2	Latão
2	27	Polia dentada Gt20.2	Latão
8	28	Rolamento Linear LM10UU	Aço
2	29	Fuso trapezoidal 8mm	Aço
4	30	Porca T para perfil alumínio 30x30	Aço
2	31	Acoplador Rígido entre eixo do motor e fuso	Aço
1	32	Correia	-
4	33	Amortecedores dos motores	Latão
1	34	Base de apoio a mesa de aquecimento	Aço
4	35	Dobradilha	Plástico
1	36	Facho da Porta frontal	Plástico
1	37	Caixa de proteção do LCD	ABS
1	38	Ecrã LCD	-
1	39	Conexão da alimentação e interruptor on/off	-
1	40	Fonte de Alimentação	-
1	41	Controlador Arduino Mega 2560 + RAMPs 1.4	-
1	42	Perfil de Borracha	Borracha
2	43	Porca T para o fuso trapezoidal	Aço
1	44	Moldura em acrílico superior	Acrílico
1	45	Moldura em acrílico frontal	Acrílico
1	46	Moldura em acrílico posterior	Acrílico
1	47	Moldura em acrílico lateral direita	Acrílico
1	48	Moldura em acrílico lateral esquerda	Acrílico
1	49	Chapa estrutural superior	Aço
1	50	Chapa estrutural inferior	Aço
1	51	Chapa estrutural posterior	Aço
1	52	Chapa estrutural frontal	Aço
20	53	Parafuso ISO 7046 M3x8	Aço
30	54	Parafuso ISO 7046 M3x6	Aço
1	55	Base levadiça onde está inserida a mesa	Aço
8	56	Parafuso ISO 4762 M3x6	Aço
16	57	Parafuso ISO 4762 M3x12	Aço
6	58	Parafuso ISO 4762 M5x12	Aço
3	59	Parafuso ISO 4762 M3x20	Aço
8	60	Parafuso ISO 4762 M4x8	Aço
2	61	Suporte rolamentos lineares na direcção Y	Aço
2	62	Suporte rolamentos lineares na direcção Y	Aço
6	63	Parafuso ISO 4762 M4x10	Aço
1	64	Suporte de apoio da cabeça extrusora	Aço
2	65	Suporte do motor na direcção Z	Aço

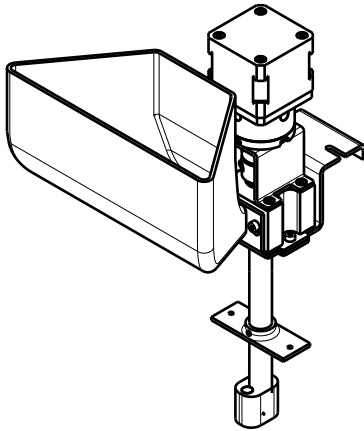
Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado	
DRAWING TITLE	
DRAWN BY Ruben Pinto - 599599	DATE 13/11/2016
CHECKED BY XXX	DATE XXX
DESIGNED BY XXX	DATE XXX
Impressora FDM com alimentação por granulado	
SIZE A0	DRAWING NUMBER REV X
SCALE 1:2	WEIGHT(kg) XXX
SHEET 1/1	



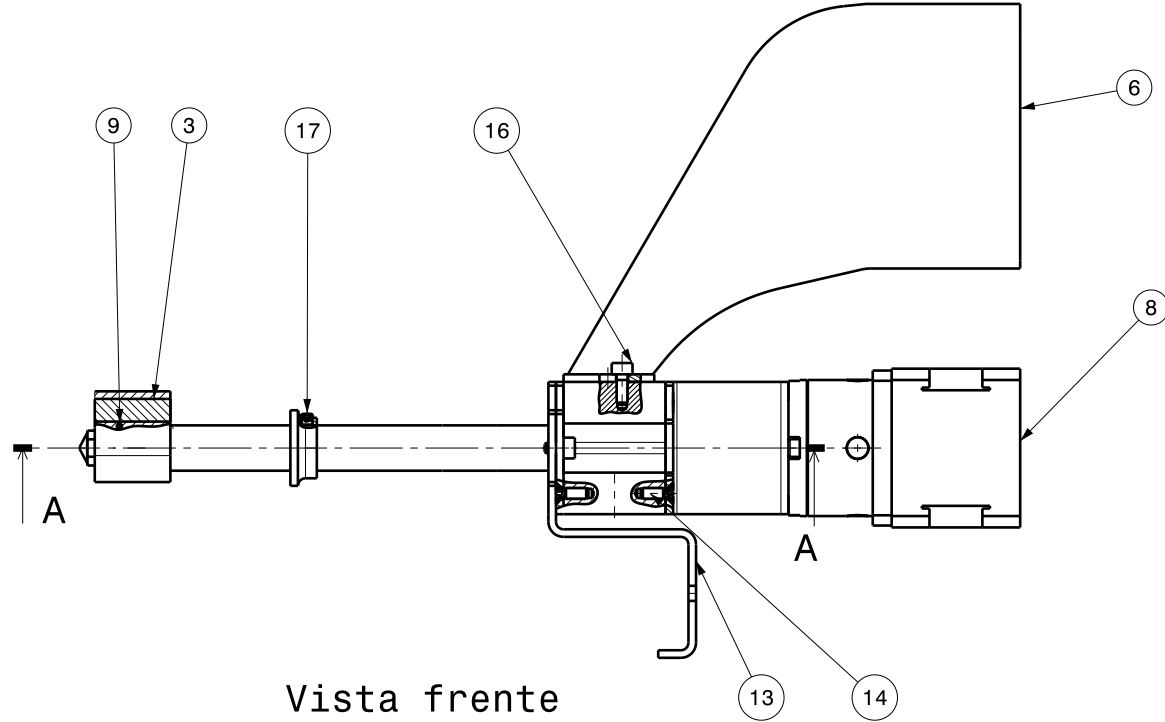
Vista direita



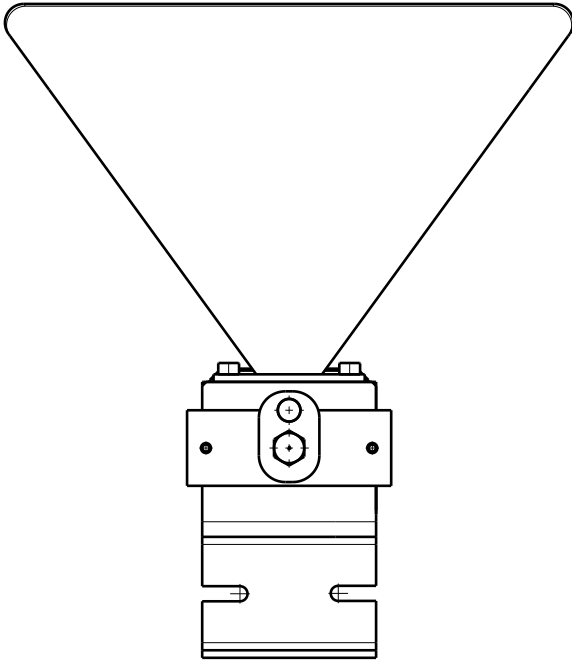
Secção A-A



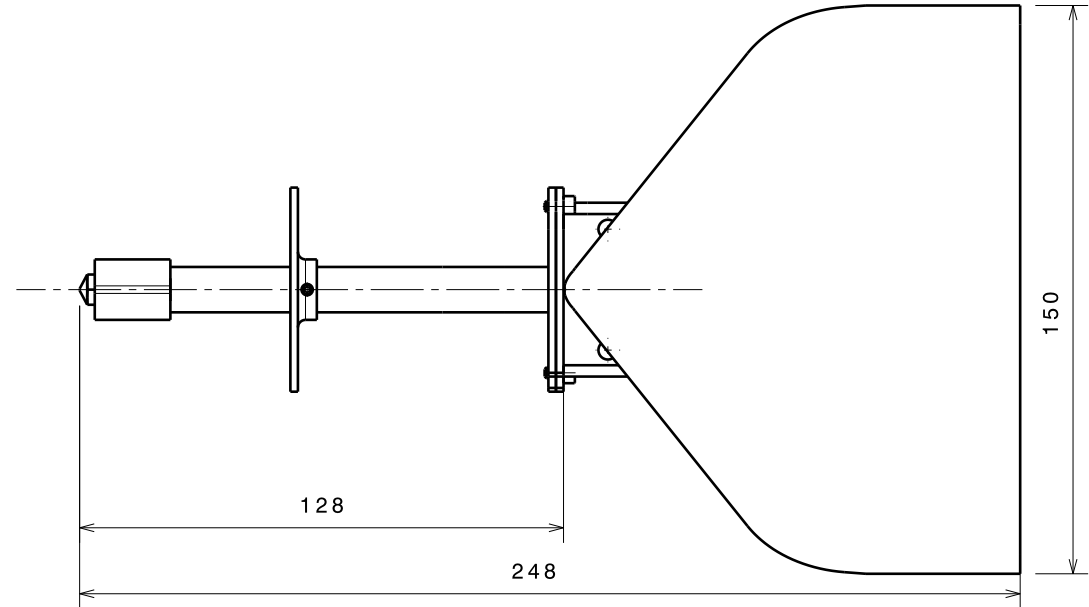
Vista isométrica
Escala: 1:4



Vista frente



Vista esquerda



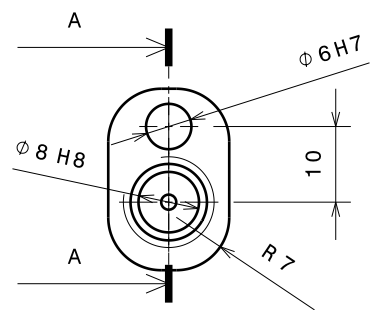
Vista de cima

Qt.	Nº	Designação	Material
1	1	Bico de extrusão 0.4mm	Bronze
1	2	Bloco de aquecimento	Alumínio
1	3	Cartucho aquecedor	Aço
1	4	Cilindro de plastificação	Aço
1	5	Fuso de alimentação	Aço
1	6	Fúnil	Abs
1	7	Suporte do fúnil	Alumínio
1	8	Motor Nema com redutor 5:1	-
1	9	Termistor 100k NTC 3950	-
1	10	Acoplador rígido	Aço
1	11	Suporte do cilindro	Aço
1	12	Rolamento 688DD	-
1	13	Suporte da cabeça extrusora	Aço
8	14	Parafuso ISO 7046 M3x8	Aço
6	15	Parafuso ISO 4762 M3x5	Aço
2	16	Parafuso ISO 4762 M3x8	Aço
1	17	Parafuso ISO 4026 M3x3	Aço

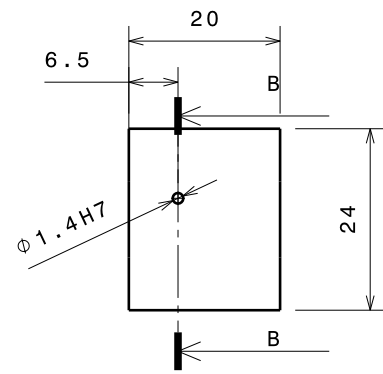
DRAWN BY Ruben Pinto - 599599		DATE 29/11/2016		Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado			
				DRAWING TITLE			
CHECKED BY XXX		DATE XXX		SIZE A2	DRAWING NUMBER Conjunto Cabeça Extrusora		REV X
DESIGNED BY XXX		DATE XXX		SCALE 1:2	WEIGHT(kg) XXX	SHEET 1/1	

Apêndice E

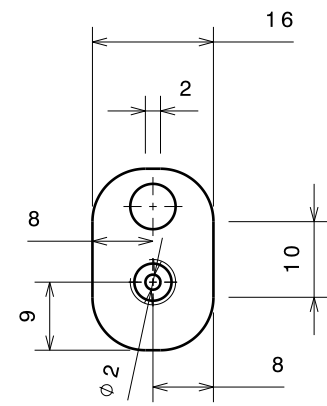
Desenhos de Definição



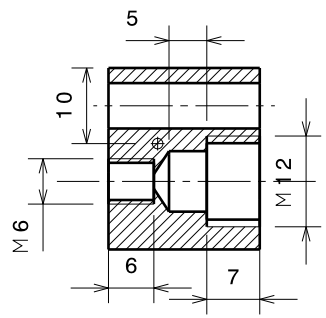
Vista direita



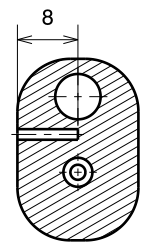
Vista de frente



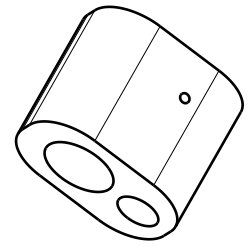
Vista esquerda



Secção A-A



Secção B-B



Vista isométrica

ISO 8015 ISO 2768-mK Material: Alumínio		Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado			
DRAWN BY Ruben Pinto - 59959		DATE 14/11/2016		DRAWING TITLE Bloco de Aquecimento	
CHECKED BY XXX		DATE XXX		SIZE A4	REV X
DESIGNED BY XXX		DATE XXX		SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XXX
				SHEET 1/1	

4

3

2

1

D

C

B

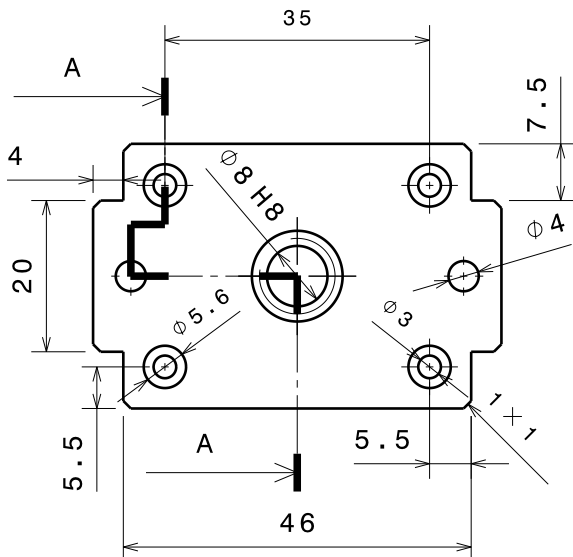
A

4

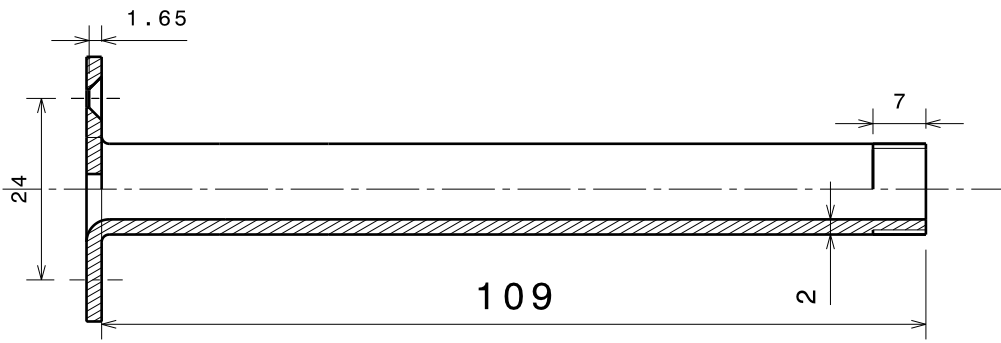
3

2

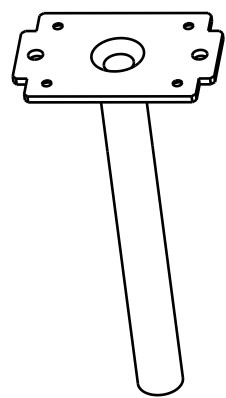
1



Vista de frente



Secção A-A

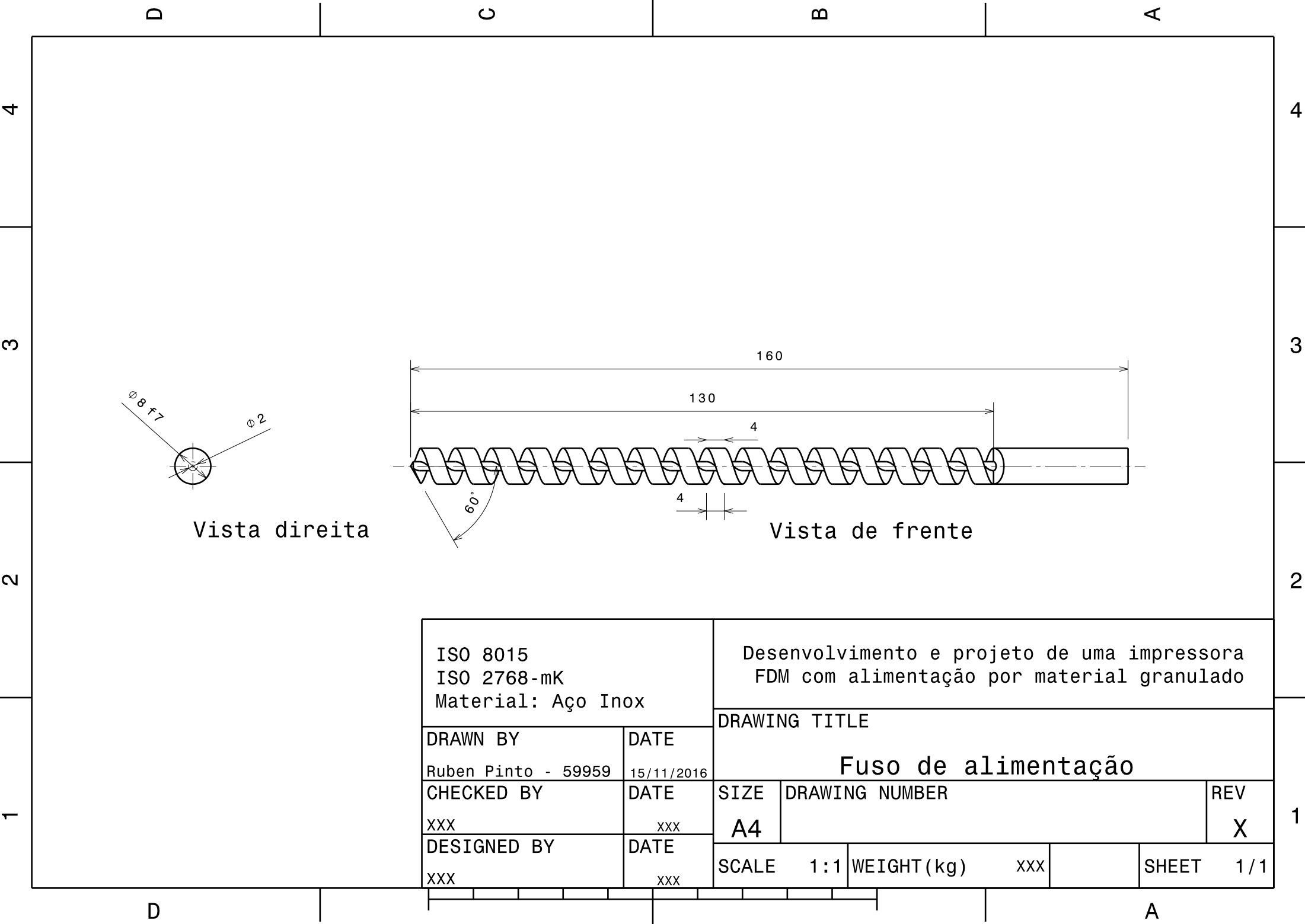


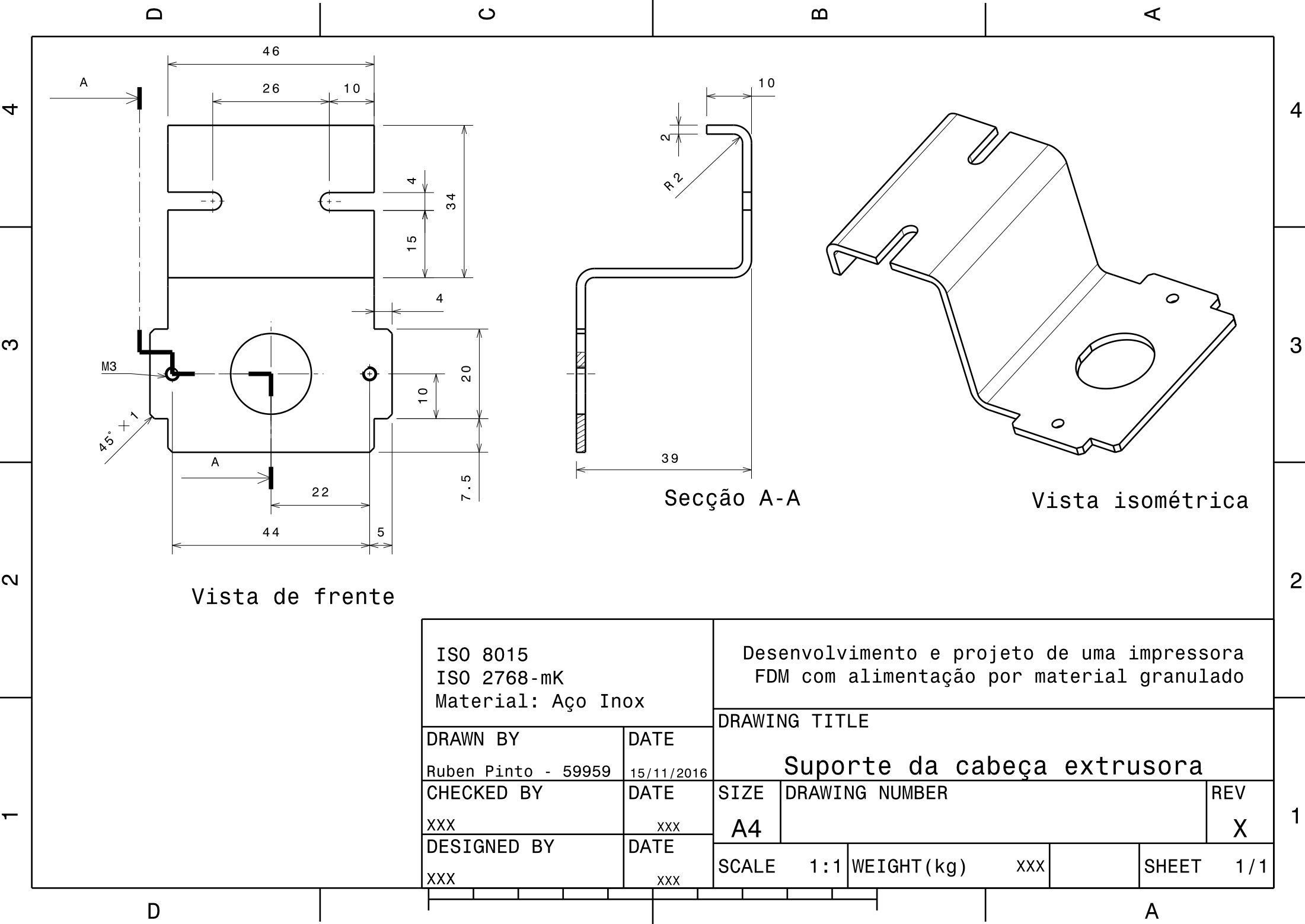
Vista isométrica

ISO 8015 ISO 2768-mK Material: Aço Inox		Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado			
DRAWN BY Ruben Pinto - 59959		DATE 14/11/2016		DRAWING TITLE Cilindro de Plastificação	
CHECKED BY XXX		DATE XXX		SIZE A4	REV X
DESIGNED BY XXX		DATE XXX		SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XXX
				SHEET 1/1	

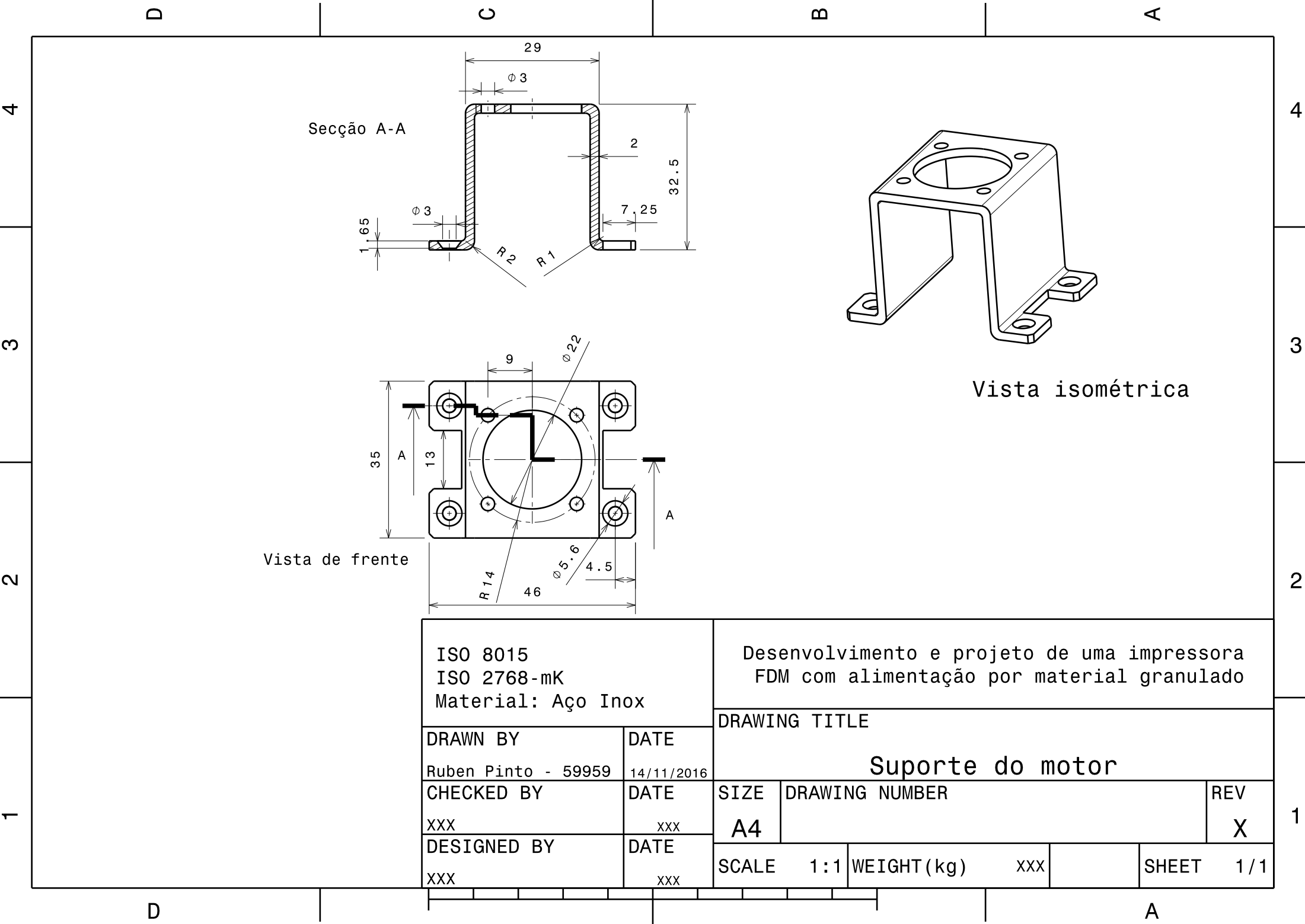
D

A

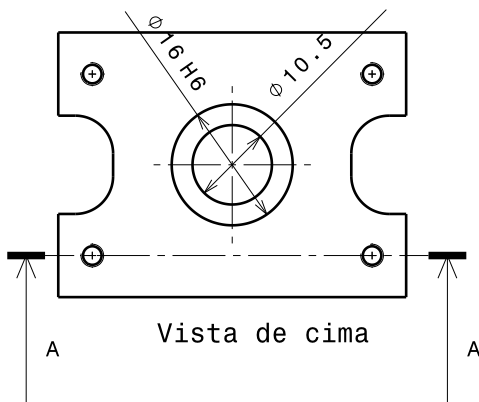
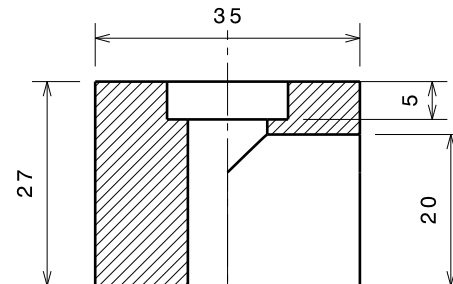
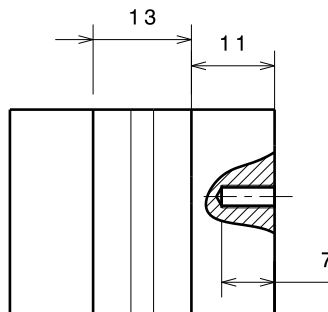
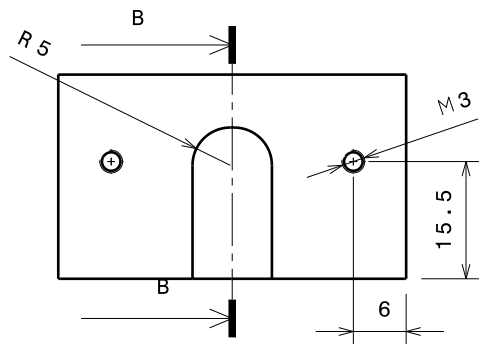
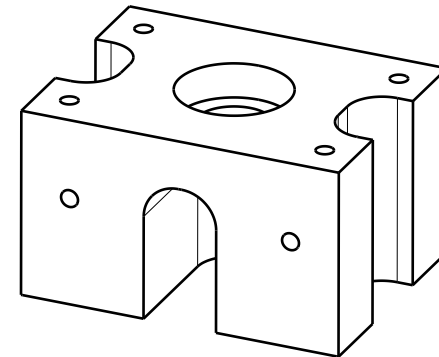
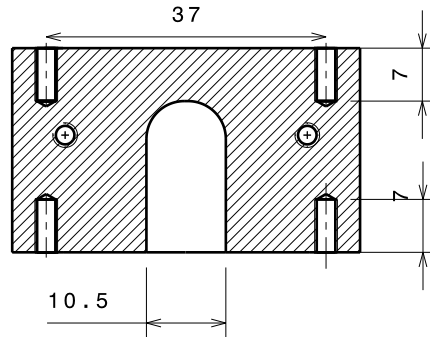
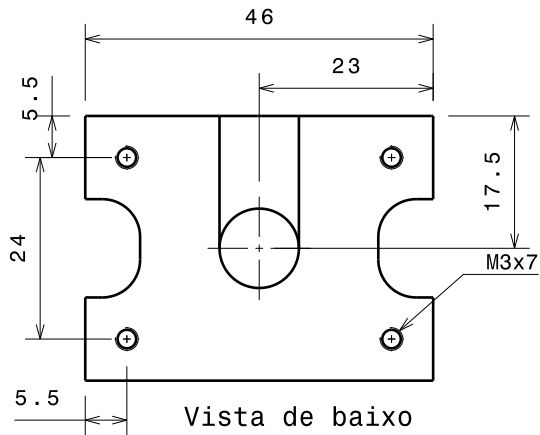




ISO 8015 ISO 2768-mK Material: Aço Inox		Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado			
DRAWN BY		DRAWING TITLE			
Ruben Pinto - 59959	15/11/2016	Suporte da cabeça extrusora			
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER		REV
XXX	XXX	A4			X
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1	WEIGHT(kg)	SHEET
XXX	XXX			XXX	1 / 1



ISO 8015 ISO 2768-mK Material: Aço Inox		Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado			
DRAWN BY		DRAWING TITLE			
Ruben Pinto - 59959		Suporte do motor			
CHECKED BY		SIZE	DRAWING NUMBER		REV
XXX		A4			X
DESIGNED BY		SCALE	1:1	WEIGHT(kg)	
XXX				XXX	
				SHEET	1/1



ISO 8015 ISO 2768-mK Material: Alumínio		Desenvolvimento e projeto de uma impressora FDM com alimentação por material granulado		
DRAWN BY Ruben Pinto - 59959		DRAWING TITLE Suporte do fúnil e rolamento		
CHECKED BY XXX	DATE 14/11/2016	SIZE A4	DRAWING NUMBER Suporte Rolamentos	REV X
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:1	WEIGHT(kg) XXX	SHEET 1/1

